

WAGNER ISIDORO SIMIONI

**ANÁLISE DE ERROS NA MEDIÇÃO DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE
MATERIAIS ATRAVÉS DO MÉTODO FLUXIMÉTRICO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Construção Civil

Orientador: Prof. Enedir Ghisi, PhD

Co-orientador: Prof. Dr. Saulo Güths

FLORIANÓPOLIS


2005


FOLHA DE APROVAÇÃO

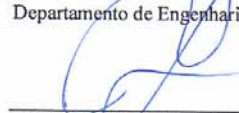
WAGNER ISIDORO SIMIONI

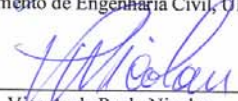
**ANÁLISE DE ERROS NA MEDIÇÃO DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE
MATERIAIS ATRAVÉS DO MÉTODO FLUXIMÉTRICO**

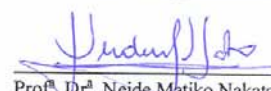
Dissertação aprovada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pela seguinte banca examinadora:

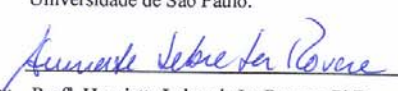

Orientador: Prof. Enedir Ghisi, PhD.
Departamento de Engenharia Civil, UFSC.


Co-orientador: Prof. Dr. Saulo Guths
Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC.


Banca: Prof. Roberto Lamberts, PhD.
Departamento de Engenharia Civil, UFSC.


Prof. Dr. Vicente de Paulo Nicolau
Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC.


Prof. Dr. Neide Matiko Nakata Sato
Universidade de São Paulo.


Coordenador: Prof. Henriette Lebre de La Rovere, PhD.
Coordenadora do PPGEC

Florianópolis, 25 de fevereiro de 2005.

*A meus pais:
Ladir Luiz e Maria.*

AGRADECIMENTOS

Ao sempre presente Prof. Enedir Ghisi pela dedicada orientação, paciência, atenção, amizade e otimismo demonstrado durante estes dois anos de pós-graduação na ECV-UFSC.

Ao Prof. Saulo Güths pela orientação durante as medições e excelente convivência durante minha permanência no LMPT.

Aos professores Roberto Lamberts, Vicente de Paulo Nicolau e Neide Matiko Nakata Sato por aceitarem fazer parte da banca examinadora.

A minha família pela compreensão e apoio.

Ao Prof. Carlos Alfredo Clezar que me incentivou a cursar a pós-graduação.

Aos amigos do LabEEE Deivis Luis Marinoski e Martin Ordenes pela amizade durante todo este período.

Aos colegas do LMPT e principalmente aos amigos Alexandre, Victor e Rossano pela força com o EES e programas de CFD.

Ao LabCET, na pessoa do bolsista Rafael Catapan, pelo empréstimo do equipamento de termografia.

Aos meus amigos de Pinhal pela torcida e pelos necessários momentos de descontração.

A Furnas Centrais Elétricas S/A. pelo apoio financeiro.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma investigação experimental e teórica sobre o uso do método fluximétrico para determinação de condutividade térmica em materiais de construção civil; particularmente materiais com condutividades térmicas entre 0,04 e 1,00W/mK. O objetivo principal é efetuar uma análise dos erros decorrentes da aplicação deste método. As medições foram realizadas de acordo com a Norma ISO 8301 e Projeto de Norma Brasileira 02:135.07-001/5. Utilizaram-se amostras de poliestireno expandido e vidro, com espessuras de 10 e 20mm, nas quais foram efetuadas as medições de condutividade térmica. Analisou-se, também, através de um modelo matemático, a influência dos diversos parâmetros como: material e espessura da amostra, isolamento lateral, coeficiente de troca de calor por convecção, material do fluxímetro e temperatura da placa fria no valor da condutividade térmica medida. Através das simulações, verificou-se que a principal fonte de erro nas medições é a espessura e o material da amostra ensaiada. Sendo que quanto maior a condutividade térmica da amostra, menor é o erro, ao passo que quanto maior a espessura da amostra, maior é o erro na medição da condutividade térmica, podendo chegar a 8,0% em amostras de poliestireno expandido de 20mm de espessura. O isolamento lateral da amostra e do fluxímetro pode minimizar muito o erro na medição. O coeficiente de troca de calor por convecção tem influência nos erros da medição; coeficientes de convecção elevados geram erros maiores. Em amostras de poliestireno expandido com espessura de 20mm, os erros podem chegar a 17,0% com um coeficiente de troca igual a 20W/m²K. O material do fluxímetro também é responsável por erros nas medições, sendo que quanto maior for a condutividade térmica do fluxímetro, maior é o erro na medição. Fluxímetros com condutividades térmicas inferiores a 1,00W/mK, apresentam erros de 1,0% na medição da condutividade térmica. Em relação à temperatura da placa fria, quanto menor for esta, menor o erro na medição. Sendo que para temperaturas em torno de 22,0°C, os erros são inferiores a 1,0% para as amostras testadas. Aumentando a espessura do anel de proteção lateral os erros diminuem, podendo chegar a 1,0% em amostras de vidro. A principal conclusão da pesquisa é que deve-se maximizar o isolamento lateral e a dimensão do anel de guarda e minimizar a espessura da amostra, o coeficiente de troca de calor por convecção, a condutividade térmica do fluxímetro e a temperatura da placa fria.

ABSTRACT

This work presents a theoretical and experimental investigation on the use of a heat flow meter apparatus for measurement of thermal conductivity of building materials, particularly materials with thermal conductivity between 0.04 and 1.00W/mK. The main objective of this research is to perform an analysis to identify the errors associated with the application of heat flow meters. The measurements were made in compliance with ISO 8301 and the Brazilian Standard Project 02:135.07-001/5. Expanded polystyrene and glass samples with thickness of 10 and 20mm were used in the experiment. Through a mathematical model, the influence of several parameters, such as type of material and thickness, lateral insulation, convection heat transfer coefficient, heat flow meter material and cold plate temperature, on the thermal conductivity were investigated. Through computer simulations, it was verified that the type of material and thickness are the main sources of error. Samples with low thermal conductivities and larger thickness produce larger errors. These errors can reach up to 8.0% in expanded polystyrene samples with thickness of 20mm. Lateral insulation of both the sample and heat flow meter can minimize errors. Using an insulation thickness of 50mm on the sample mentioned above, errors could be reduced to 1.5%. The convection heat transfer coefficient has also influence on the errors associated with measurement of thermal conductivity. In expanded polystyrene samples with thickness of 20mm, the errors can reach up to 17.0% for convection coefficients equal to 20W/m²K. As for the type of material used to manufacture the heat flow meter, it was observed that heat flow meter with thermal conductivity lower than 1.00W/mK produces errors as low as 1.0% in thermal conductivity measurements. Regarding the cold plate temperature, it was found that the lowest its temperature the lowest the errors. For cold plate temperatures of about 22.0°C, the errors are lower than 1.0%. It was also observed that the guard ring can minimize errors; in glass samples this error can reach 1.0%. The main conclusion of this research is that lateral insulation and dimension of the guard ring must be maximized, and the thickness of the sample, convection coefficient, thermal conductivity of the heat flow meter and the temperature of the cold plate must be minimized.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Valores de condutividade térmica para alguns materiais de construção civil, segundo o Projeto de Norma 02:135.07-001/2 (2003).....	8
Figura 2.1	Arranjo geral do equipamento placa quente protegida, montado na forma simétrica.....	14
Figura 2.2	Erros na medição da condutividade térmica em função da espessura da amostra e do desbalanceamento de temperaturas entre o núcleo aquecedor e o anel de guarda.....	16
Figura 2.3	Erro na medição da condutividade em função da diferença de temperatura na amostra e pontes de calor devido a termopares.....	17
Figura 2.4	Influência da instalação de termopares na condutividade térmica.....	18
Figura 2.5	Desvios dos resultados em relação aos valores do NPL nas medições com a placa quente protegida em amostras espessas.....	20
Figura 2.6	Desvios dos resultados em relação aos valores do NPL nas medições com a placa quente protegida em amostras finas.....	20
Figura 2.7	Arranjos possíveis para o método fluximétrico.....	22
Figura 2.8	Hipótese de distribuição das linhas de fluxo de calor.....	23
Figura 2.9	Valores de condutividade térmica obtidos na placa quente protegida do NIST para amostras de fibra de vidro de alta densidade.....	24
Figura 2.10	Desvios dos resultados em relação aos valores obtido na placa quente protegida do NIST.....	25
Figura 2.11	Desvios dos resultados em relação aos valores do NPL nas medições com fluxímetros em amostras espessas.....	26
Figura 2.12	Desvios dos resultados em relação aos valores do NPL nas medições com fluxímetros em amostras finas.....	27
Figura 2.13	Esquema de um fluxímetro a gradiente transversal.....	28

Figura 2.14	Exemplos de fluxímetros a gradiente transversal do tipo espira e tipo termopilha.....	28
Figura 2.15	Corte transversal no fluxímetro a gradiente tangencial.....	29
Figura 2.16	Exemplo de transdutor a gradiente tangencial.....	29
Figura 2.17	Arranjo experimental do método da Linha Fonte.....	30
Figura 2.18	Corpo-de-prova utilizado para medições de condutividade térmica.....	31
Figura 2.19	Esquema do experimento do método calorímetro a água.....	32
Figura 2.20	Esquema do método do tubo quente.....	33
Figura 3.1	Equipamento de termografia utilizado nos ensaios.....	36
Figura 3.2	Experimento de termografia efetuado na resistência aquecedora.....	37
Figura 3.3	Fluxímetro a gradiente tangencial utilizado no experimento.....	38
Figura 3.4	Resistência aquecedora utilizada no método fluximétrico.....	38
Figura 3.5	Esquema de montagem para calibração do fluxímetro auxiliar.....	40
Figura 3.6	Esquema de calibração dos fluxímetros A e B.....	40
Figura 3.7	Determinação da resistência térmica do conjunto de fluxímetros.....	42
Figura 3.8	Fonte de alimentação da resistência aquecedora.....	44
Figura 3.9	Sistema de aquisição de sinais.....	44
Figura 3.10	Montagem do experimento do método fluximétrico.....	46
Figura 3.11	Experimento real do método fluximétrico.....	46
Figura 3.12	Equipamento utilizado para monitorar a temperatura e a umidade do ar no interior do laboratório.....	49
Figura 3.13	Modelo matemático simples para analisar o erro na medição da condutividade térmica.....	50
Figura 3.14	Esquema adotado para o modelo matemático.....	52
Figura 3.15	Dados de entrada para o modelo matemático.....	54
Figura 3.16	Esquema de composição do fluxímetro para a simulação.....	56
Figura 3.17	Esquema do circuito elétrico análogo ao circuito térmico.....	56
Figura 4.1	Fases da termografia na resistência aquecedora do método fluximétrico.....	60
Figura 4.2	Distribuição de temperaturas na resistência aquecedora do método fluximétrico.....	60

Figura 4.3	Comportamento da temperatura do ar do laboratório onde foram realizadas as medições.....	62
Figura 4.4	Comportamento da umidade relativa do ar do laboratório onde foram realizadas as medições.....	63
Figura 4.5	Densidade de fluxo de calor medidos durante ensaio com amostra de vidro de 10mm de espessura.....	64
Figura 4.6	Comportamento da diferença da densidade de fluxo de calor medidos pelos fluxímetros superior e inferior.....	65
Figura 4.7	Comportamento da diferença de temperatura entre as faces quente e fria de uma amostra de vidro de 10mm ensaiada no método fluximétrico.....	65
Figura 4.8	Comportamento da diferença de fluxos de calor entre os fluxímetros superior e inferior no ensaio de uma amostra de poliestireno expandido de 10 e 20mm de espessura.....	67
Figura 4.9	Densidades de fluxo de calor medidas pelos fluxímetros em ensaio com amostra de poliestireno expandido de 20mm de espessura.....	70
Figura 4.10	Valores de fluxo de calor obtidos pelo modelo matemático.....	71
Figura 4.11	Influência do material e da espessura da amostra no valor da condutividade térmica medida.....	73
Figura 4.12	Influência da utilização de isolamento lateral no valor da condutividade térmica medida.....	74
Figura 4.13	Influência do coeficiente de troca de calor por convecção no valor da condutividade térmica medida.....	75
Figura 4.14	Influência do material do fluxímetro no valor da condutividade térmica medida.....	76
Figura 4.15	Influência da temperatura da placa fria no valor da condutividade térmica medida.....	77
Figura 4.16	Influência do anel de proteção lateral no valor da condutividade térmica em amostras de poliestireno expandido.....	78

Figura 4.17	Influência do anel de proteção lateral no valor da condutividade térmica em amostras de vidro.....	79
Figura 4.18	Fluxímetro com <i>gap</i>	80
Figura 4.19	Densidades de fluxo de calor medidas pelos fluxímetros modificados com <i>gap</i> no ensaio de uma amostra de poliestireno expandido de 20mm de espessura.....	81
Figura 4.20	Diferenças nas densidades de fluxo de calor medidas pelos fluxímetros modificados com <i>gap</i> no ensaio de amostras de poliestireno expandido de 10 e 20mm de espessura.....	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Condições associadas a cada curva da Figura 2.2.....	16
Tabela 2.2	Condições associadas a cada curva da Figura 2.3.....	17
Tabela 4.1	Constantes de calibração dos fluxímetros.....	61
Tabela 4.2	Valores de densidade de fluxo de calor, diferença de temperatura e condutividade térmica para amostras de vidro de 10 e 20mm de espessura.....	66
Tabela 4.3	Valores de densidade de fluxo de calor, diferença de temperatura e condutividade térmica para amostras de poliestireno expandido de 10 e 20mm de espessura.....	68
Tabela 4.4	Teste do modelo matemático.....	71
Tabela 4.5	Comparação entre as densidades de fluxo de calor e condutividades térmicas medidas pelos fluxímetros com <i>gap</i> e original em amostras de poliestireno expandido com espessura de 20mm.....	83
Tabela 4.6	Comparação dos valores de condutividade térmica obtidos em amostras de 10 e 20mm com a utilização do fluxímetro com <i>gap</i>	83

SUMÁRIO

RESUMO	V
ABSTRACT	VI
LISTA DE FIGURAS.....	VII
LISTA DE TABELAS	XI
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 JUSTIFICATIVAS	2
1.2 MEDIÇÃO DAS PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DOS MATERIAIS.....	4
1.3 VALORES DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA PARA MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO.....	7
1.4 OBJETIVOS	8
1.4.1 Objetivo Geral.....	8
1.4.2 Objetivos específicos	9
1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	9
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1 INTRODUÇÃO	12
2.2 MÉTODO DA PLACA QUENTE PROTEGIDA	12
2.2.1 Princípio do método e características do equipamento	12
2.2.2 Análise de erros no método da placa quente protegida.....	14
2.3 MÉTODO FLUXIMÉTRICO	21
2.3.1 Princípio do método e características do equipamento	21
2.3.2 Análise de erros no método fluximétrico	23
2.3.3 Alguns tipos de fluxímetros	27
2.4 MÉTODO DA LINHA FONTE OU FIO QUENTE	29
2.5 MÉTODO DO CALORÍMETRO A ÁGUA	31
2.6 MÉTODO DO DISCO QUENTE.....	32
2.7 MÉTODO DO TUBO QUENTE.....	32
3. METODOLOGIA	35

3.1 INTRODUÇÃO	35
3.2 ENSAIOS DE TERMOGRAFIA.....	35
3.2.1 O equipamento utilizado	35
3.2.2 Os procedimentos adotados nos ensaios	36
3.3 UTILIZAÇÃO DO MÉTODO FLUXIMÉTRICO.....	37
3.3.1 Fluxímetros a gradiente tangencial utilizados no experimento.....	37
3.3.2 Calibração dos fluxímetros a gradiente tangencial	39
3.3.3 Medição da resistência térmica dos fluxímetros	42
3.4 EQUIPAMENTOS SUPLEMENTARES.....	43
3.5 PROCEDIMENTOS ADOTADOS PARA A MEDIÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA.....	45
3.5.1 Montagem do experimento	45
3.5.2 Medição do fluxo de calor.....	47
3.5.3 Área de medição.....	48
3.5.4 Espessura das amostras	48
3.5.5 Medição de temperatura.....	48
3.5.6 Condição de regime permanente.....	48
3.5.7 Condições do laboratório	49
3.6 MODELAGEM MATEMÁTICA.....	50
3.6.1 O problema a ser simulado e o modelo matemático adotado.....	50
3.6.2 Comparação dos resultados do modelo matemático com os dados experimentais	53
3.6.3 Casos simulados no modelo matemático	54
3.6.4 Hipóteses adotadas no modelo	55
3.7 MEDIÇÕES PÓS-SIMULAÇÃO.....	57
4. RESULTADOS.....	58
4.1 INTRODUÇÃO	59
4.2 ANÁLISE DE TERMOGRAFIA	59
4.3 MEDIÇÕES COM O MÉTODO FLUXIMÉTRICO	61
4.3.1 Constantes de calibração, incerteza de medição e resistência térmica referente aos fluxímetros	61
4.3.2 Medições de condutividade térmica.....	62

4.3.2.1 Condições do laboratório onde foram realizados os ensaios	62
4.3.2.2 Medições nas amostras de vidro	63
4.3.2.3 Medições nas amostras de poliestireno expandido	66
4.3.3 Problemas encontrados no método fluximétrico.....	68
4.4 MODELAGEM MATEMÁTICA DO EXPERIMENTO.....	69
4.4.1 Análise da equação obtida pelo modelo analítico simples e dados obtidos pelo modelo matemático	69
4.4.2 Influência do material e espessura da amostra no valor da condutividade térmica	72
4.4.3 Influência da utilização do isolamento lateral no valor da condutividade térmica	73
4.4.4 Influência do coeficiente de troca de calor por convecção no valor da condutividade térmica.....	74
4.4.5 Influência do material construtivo do fluxímetro no valor da condutividade térmica.	75
4.4.6 Influência da temperatura da placa fria no valor da condutividade térmica	76 BN
4.4.7 Influência da dimensão do anel de proteção lateral no valor da condutividade térmica.....	77
4.5 MEDIÇÕES PÓS-SIMULAÇÃO.....	79
5. CONCLUSÕES	84
5.1 CONCLUSÕES REFERENTES AOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	85
5.2 RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	87
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	88
APÊNDICES	94
APÊNDICE A. CALIBRAÇÃO DE TERMOPAR.....	95
APÊNDICE B. EQUAÇÕES UTILIZADAS NO MODELO MATEMÁTICO	96
APÊNDICE C. DEDUÇÃO DA EQUAÇÃO PARA AVALIAR O ERRO PERCENTUAL NAS MEDIÇÕES DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA.	101

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVAS

O embargo do petróleo na década de 70 e os constantes aumentos dos preços de energia nos últimos anos forçaram a sociedade mundial a rever suas práticas quanto ao uso da energia. Os maiores impactos da crise foram sofridos nos países onde o petróleo é a principal fonte energética. O Brasil não sofreu grandes impactos em função da crise de 70, pois sua dependência ao petróleo é pequena comparada aos demais países. O grande potencial hidráulico do país e o extinto Pró-alcool auxiliaram, na época, a minimizar possíveis problemas na oferta energética para o desenvolvimento do país.

Recentemente, entre o segundo semestre de 1999 e início de 2000, o sistema de geração elétrica nacional, cuja geração por usinas hidrelétricas respondia na época por 95% do total (MME, 2000), enfrentou problemas devido à estiagem provocada pelo fenômeno *El Niño* e também pela falta de investimentos no setor. Em julho de 2000, o Presidente da República assinou o decreto nº 3.330, que determinava que todos os prédios da Administração Pública Federal deveriam reduzir o consumo de energia em 20%, em relação aos dados de consumo de 1998, até 31 de dezembro de 2002. Porém, em maio de 2001 o governo editou mais um decreto (nº 3.818) que determinava a redução de 35% do consumo de energia elétrica em prédios públicos federais a partir do mês de junho daquele ano, em relação ao consumo medido no mesmo mês do ano anterior.

Em função da recente crise energética, o setor da construção civil brasileira, começou a concentrar seus esforços no sentido de promover o uso eficiente da energia elétrica. Em São Paulo, de acordo Geller (1992), nos setores público e comercial, o condicionamento de ar e a iluminação artificial respondem por 20% e 44% do consumo de energia elétrica, respectivamente. O envelope da edificação é responsável pelas trocas térmicas entre o meio externo e interno afetando o consumo de energia em climatização artificial.

Com a crescente evolução dos microcomputadores pessoais, a simulação computacional vem sendo utilizada a fim de se verificar possíveis melhorias no desempenho termo-energético de edifícios, auxiliando o projetista na escolha da melhor forma de tornar

seu projeto eficiente no que tange ao consumo energético sem, no entanto, privar o usuário das condições mínimas de conforto.

Atualmente, existem programas computacionais que simulam o consumo energético de edificações a partir de dados climáticos, ocupação, equipamentos (iluminação e climatização entre outros) e materiais de construção, facilitando a realização dos cálculos, muitas vezes iterativos, necessários para se avaliar os processos de transmissão de calor nos edifícios.

No âmbito dos materiais de construção, o perfeito conhecimento das suas propriedades termofísicas é importante para o estudo do desempenho termo-energético de edificações. Lam et al. (1997) realizaram um estudo para avaliar a influência de diferentes parâmetros no consumo de energia de edifícios de escritórios localizados em Hong-Kong. O estudo foi realizado mediante simulações computacionais com o programa computacional VisualDOE. Inicialmente, o estudo avaliou 62 variáveis: 29 relativas ao envelope da edificação, 17 relativas ao sistema de climatização artificial e 16 relativas aos equipamentos de climatização. Foram realizadas 387 simulações e detectou-se que das 62 variáveis testadas apenas 28 apresentaram relação direta com o consumo de energia do edifício. Numa outra etapa, foi realizada uma análise envolvendo as 28 variáveis relacionadas diretamente com o consumo energético. Como resultado foi constatado que 12 das 28 variáveis influenciam de forma significativa no consumo energético do edifício. Destas 12 variáveis, 6 são relativas ao envelope da edificação, 4 relativas ao sistema de climatização e 2 relativas aos equipamentos de climatização. As seis variáveis referentes à edificação são i) coeficiente de sombreamento, ii) percentagem de área envidraçada, iii) temperatura interna do ar, iv) carga de equipamentos, v) carga de iluminação e vi) densidade de ocupação. Das variáveis relativas ao envelope, as que mais influenciam no consumo energético são o coeficiente de sombreamento dos vidros e a percentagem de área envidraçada em relação à área total da fachada. Convém ressaltar que foram simulados edifícios altos (10 a 50 pavimentos); talvez, por esta razão, variáveis como a transmitância térmica do telhado não tenha influenciado significativamente no consumo energético. Em edificações térreas, a cobertura tem uma grande parcela de contribuição no consumo de energia em climatização.

A transmitância térmica de um elemento construtivo é função dos materiais que o compõe. O conhecimento das propriedades termofísicas dos materiais componentes do elemento é fundamentalmente importante. No Brasil, ainda não existe uma cultura de investigação das propriedades térmicas de materiais de construção. Poucos laboratórios nacionais possuem equipamentos para ensaios do gênero. Em nosso país, em se tratando de condutividade térmica, além do Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas dos Materiais (LMPT) da UFSC, somente o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) possui equipamento de placa quente protegida, que segundo Moura (1993), é um método primário de medição desta propriedade. A grande maioria das propriedades termofísicas dos materiais de construção disponíveis é resultado de pesquisas realizadas no exterior. A falta de tradição neste tipo de medição no país, força os pesquisadores brasileiros a adotarem valores que podem não estar representando adequadamente os materiais produzidos aqui no Brasil. Desta forma, é fundamental que as técnicas de medições de propriedades termofísicas sejam entendidas e difundidas em todo o país, para que futuramente possam se ter dados confiáveis para os diversos materiais produzidos e utilizados na construção civil brasileira.

1.2 MEDIÇÃO DAS PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DOS MATERIAIS

Os métodos de medição das propriedades térmicas são divididos em dois grupos: i) métodos estacionários e ii) métodos dinâmicos. Segundo Moura (1993), os métodos dinâmicos são mais rápidos, porém são mais difíceis de serem realizados. Os métodos estacionários são mais fáceis, no entanto, demandam grande quantidade de tempo para estabelecer o regime permanente de transmissão de calor no experimento. Métodos transientes ou dinâmicos podem, além da condutividade térmica, permitir a medição da difusividade térmica e calor específico dos materiais.

A condutividade térmica, segundo Incropera e De Witt (1998), é uma das propriedades de transporte de matéria, que fornece uma indicação da taxa segundo a qual a energia térmica é transferida pelo processo de difusão. A condutividade térmica dos materiais sólidos variam de valores baixos, como os dos isolantes térmicos (em torno de

0,04W/mK, caso do poliestireno expandido), até magnitudes maiores (em torno de 400W/mK, caso do cobre). É normal, também, que a condutividade térmica de um material seja maior quanto maior for a sua densidade, pois os materiais isolantes, na sua maioria, são compostos de uma matriz sólida que armazena ar, ou outro gás, no seu interior.

Desde a época que Fourier definiu a condutividade térmica, pesquisadores como Peclet, Forbes e Christiansen já iniciavam o desenvolvimento de sistemas para a sua medição (GÜTHS, 1990). Para se medir as propriedades térmicas dos materiais, normalmente se estabelece um fluxo de calor conhecido e unidimensional nas amostras do material, de modo a manter as temperaturas das faces opostas constantes (regime permanente) e, conhecendo-se a espessura e a área da amostra, a condutividade térmica pode ser obtida, isolando-se o termo λ da Equação 1.1.

$$Q = \lambda A \frac{\Delta T}{e} \quad (1.1)$$

onde:

- λ é a condutividade térmica da amostra, W/(mK);
- Q é o fluxo de calor que atravessa a mostra, W;
- A é a área da amostra perpendicular ao fluxo de calor, m²;
- e é a espessura da amostra, m;
- ΔT é a diferença de temperaturas entre as faces quente e fria da amostra, K.

Em muitos países, segundo Moura (1993), o princípio da placa quente protegida foi normatizado e adotado como o principal método de determinação da condutividade térmica dos materiais. De acordo com Güths (1990), o método fluximétrico está bastante difundido principalmente no meio industrial devido a sua praticidade e rapidez na obtenção dos resultados.

Tanto a placa quente protegida quanto o método fluximétrico são utilizados mundialmente para determinação das propriedades térmicas dos materiais. Cada método tem a sua particularidade e, dependendo da situação, é melhor aplicável em relação ao outro.

De acordo com Zarr (2001), no *National Institute of Standards and Technology* (NIST) dos Estados Unidos, o primeiro protótipo de placa quente protegida foi desenvolvido em 1912 por Dickson e Van Dusen. Em 1974, Robson e Watson, também do NIST, publicaram resultados de uma comparação interlaboratorial onde se realizaram ensaios em amostra de cortiça com equipamentos de placa quente protegida. Os desvios encontrados foram de 3% em torno da média. No mesmo NIST, Healy (2001), utilizou um modelo computacional de elementos finitos para prever a distribuição de calor em um novo modelo de placa quente protegida para operar numa faixa de temperaturas de 90 a 900K.

Não se tem registro de nenhum estudo interlaboratorial deste gênero realizado no Brasil, e de fato são somente alguns laboratórios que possuem equipamentos para medição de propriedades térmicas de materiais de construção.

Wakili et al. (2003) desenvolveram um método transiente para determinação de capacidade térmica de materiais usando fluxímetros. Os fluxos são monitorados desde o início até o final do teste; desta forma, pode-se calcular a energia absorvida pela amostra. Güths (1990), usando uma placa quente protegida montada de forma assimétrica e dois fluxímetros um em cada face da amostra, desenvolveu um método semelhante ao de Wakili et al. (2003), fornecendo simultaneamente condutividade e capacidade térmica do material testado.

Laurenti et al. (2004) desenvolveram um método para medição das propriedades térmicas de elementos de edificações a partir de dados obtidos através da instalação de fluxímetros *in situ*. Através de dados de fluxo de calor medidos pelos fluxímetros, instalados no lado interno e externo do elemento, e valores de temperaturas interna e externa, pode-se através de um modelo matemático, calcular tanto a condutividade térmica quanto a capacidade térmica do elemento. O método é muito útil para avaliação do desempenho de paredes e estruturas existentes, as quais não podem ser ensaiadas em laboratório.

Zeng et al. (1996) desenvolveram um equipamento para medição da condutividade térmica da sílica aerogel. O equipamento possui um aquecedor de ouro com 10nm de espessura. Como este equipamento é muito fino, as perdas de calor pelas laterais podem ser desprezadas, assumindo desta forma, um fluxo de calor unidirecional através das amostras. As incertezas de medição atingidas com o equipamento são menores que 5,5%.

Lisker et al. (2001) descrevem um método transiente para medição de condutividade térmica de materiais não metálicos. O equipamento é composto de um bloco de cobre e uma base metálica, entre estes componentes é colocada a amostra que será ensaiada. Os autores chegaram a uma incerteza de 5% para condutividades térmicas na faixa de 0,1 a 1W/mK.

1.3 VALORES DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA PARA MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

No Brasil está em discussão desde 1993 um Projeto de Norma que trata de desempenho térmico de edificações e medições das propriedades termofísicas dos materiais de construção. Até então o país não possuía uma referência oficial de valores de condutividade térmica e calor específico para materiais de construção. No ano de 2003 foi publicado o Projeto de Norma 02:135.07-001/2, que apresenta valores para as propriedades termofísicas de materiais de construção usuais, porém a maioria destes dados são resultados de pesquisas realizadas no exterior, salvo algumas exceções que foram obtidas através de medições no IPT de São Paulo. A Figura 1.1 mostra valores de condutividade térmica para alguns materiais de construção, em função da densidade de massa aparente de cada material.

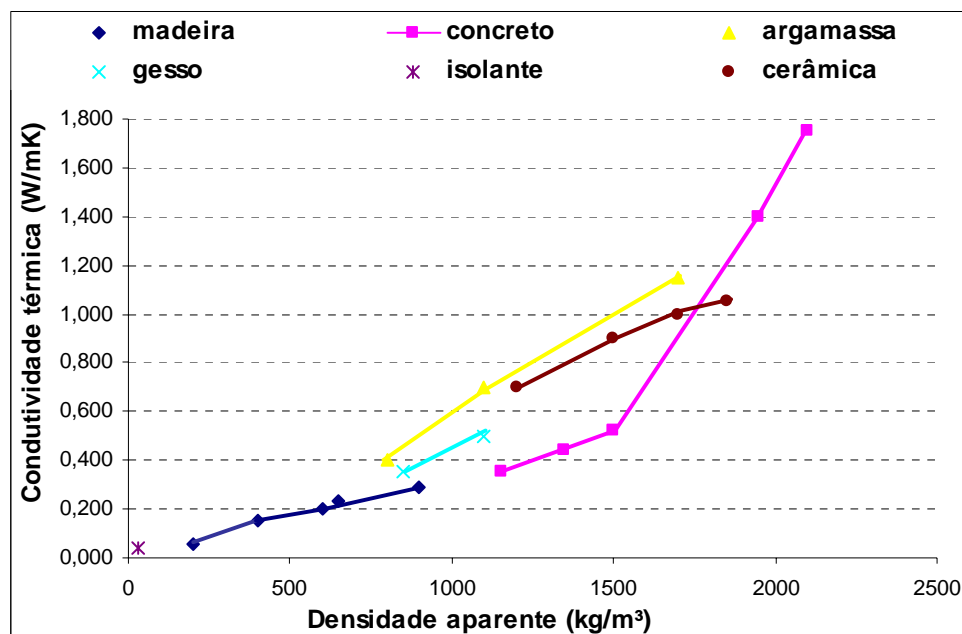


Figura 1. 1. Valores de condutividade térmica para alguns materiais de construção civil, segundo o Projeto de Norma 02:135.07-001/2 (2003).

O LMPT da UFSC realiza ensaios de condutividade térmica para empresas e comunidade em geral. O método utilizado no laboratório é o fluximétrico. No entanto, existem algumas questões relativas ao método que ainda não foram suficientemente entendidas, como a diferença observada nas medições de fluxo de calor registradas pelos fluxímetros que deveriam, ao menos numa área central, ser iguais.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo Geral

O objetivo principal desta dissertação é avaliar os erros envolvidos em medições de condutividade térmica de materiais de construção civil através da utilização de fluxímetros a gradiente tangencial.

1.4.2 Objetivos específicos

Ao longo do desenvolvimento desta dissertação, pretende-se alcançar os seguintes objetivos específicos:

- a) Através de termografia, verificar a distribuição das temperaturas na resistência aquecedora utilizada no método fluximétrico;
- b) Efetuar medições de condutividade térmica em amostras de vidro e poliestireno expandido nas espessuras de 10 e 20mm para verificar os desvios nos fluxos de calor superior e inferior que ocorrem nestes ensaios;
- c) Através de modelagem matemática do experimento, detectar e caracterizar as fugas de calor que ocorrem durante a utilização dos fluxímetros a gradiente tangencial em ensaios de condutividade térmica;
- d) Através de uma análise paramétrica, verificar a influência dos diversos parâmetros como espessura e material da amostra, isolamento térmico e coeficiente de troca de calor por convecção, material de composição do fluxímetro, temperatura da placa fria e dimensão do anel de guarda nos valores de condutividade térmica obtidos nos ensaios;
- e) Propor um novo modelo construtivo para os fluxímetros com objetivo de minimizar os erros na medição de condutividade térmica.

1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O primeiro capítulo da dissertação apresentou as justificativas da realização do presente trabalho. Posteriormente, mostrou uma introdução sobre a medição das propriedades térmicas dos materiais bem como a carência de um banco de dados para os materiais produzidos no Brasil.

O segundo capítulo apresentará uma breve revisão bibliográfica sobre os principais métodos de medição de condutividade térmica bem como as Normas Técnicas que regulamentam cada método. São apresentados também alguns estudos realizados por

laboratórios internacionais sobre medição de condutividade térmica. Importância maior é dada aos métodos da placa quente protegida e método fluximétrico. O primeiro por ser o principal método de medição de condutividade térmica, e segundo por ser objeto deste trabalho.

Já no terceiro capítulo é apresentada a metodologia adotada na pesquisa. Primeiramente, mostra-se a metodologia adotada para os ensaios experimentais e posteriormente a adotada para as simulações computacionais.

O quarto capítulo mostra os resultados obtidos com a pesquisa. Primeiramente mostra-se o resultado referente aos ensaios experimentais. Na segunda parte são mostrados os resultados das análises efetuadas com o modelo matemático desenvolvido. A última parte mostra os resultados de ensaios efetuados após as simulações computacionais.

As conclusões são mostradas no quinto capítulo. Junto a elas também são emitidas algumas recomendações e sugestões para futuros trabalhos.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados alguns métodos e equipamentos para medição de propriedades térmicas de materiais, em especial a condutividade térmica. Alguns métodos aqui apresentados têm aplicações muito específicas, como o caso do método do tubo quente.

Atenção especial é dada aos métodos placa quente protegida e fluximétrico. O primeiro por ser o método primário de medição da condutividade térmica e o segundo por ser o objeto principal deste estudo. Apresentam-se os princípios e equipamentos utilizados em cada um dos dois métodos, bem como algumas pesquisas realizadas por laboratórios que utilizam estes métodos, e que continuamente vêm buscando uma melhor compreensão dos fenômenos envolvidos neste tipo de medição.

2.2 MÉTODO DA PLACA QUENTE PROTEGIDA

2.2.1 Princípio do método e características do equipamento

O método da placa quente protegida é utilizado para determinar a condutividade térmica de amostras planas de materiais homogêneos. De modo geral, este método é usado para ensaiar amostras de materiais isolantes ou com condutividade térmica baixa. A Norma BSI BS 874 (1986) estabelece o limite máximo de condutividade térmica de 2,00 W/mK. O método da placa quente protegida é regulamentado por Normas Técnicas como a ISO 8302, ASTM C177 (americana), ANFOR NF-10 (francesa), BSI BS 874 (inglesa), DIN 52612 (alemã) e no Brasil pelo Projeto de Norma 02:135.07-001/4.

De acordo com Güths (1990), as Normas Técnicas citadas no parágrafo anterior são resultados de compilações de trabalhos científicos onde se procura a compreensão dos diversos fenômenos envolvidos na utilização do método da placa quente protegida. Estas

Normas são continuamente revisadas, principalmente em função dos avanços científicos em cada um dos países onde este dispositivo é utilizado.

O princípio do método é a submissão das amostras a um fluxo de calor conhecido. Medindo-se as temperaturas das faces das amostras e aplicando a Lei de Fourier (Eq. 1.1), pode-se calcular a condutividade térmica das amostras. Uma placa central (placa quente ou núcleo) é aquecida, dissipando calor por intermédio de uma resistência aquecedora, alimentada por uma fonte de “tensão-corrente”. A potência dissipada na resistência aquecedora deve ser conhecida. A placa quente tem a função de distribuir uniformemente o calor em toda a área, formando uma superfície isotérmica. O equipamento possui um anel de proteção lateral com objetivo de minimizar as perdas de calor laterais. A temperatura do anel de proteção ou de guarda é controlada de modo a aproximar-se ao máximo possível da temperatura da placa central, garantindo um fluxo de calor unidirecional e perpendicular às faces das amostras. A placa central é utilizada como área de medição, ou seja, a área considerada no cálculo da condutividade térmica. Todo calor que atravessa as amostras é retirado nas placas extremas (placas frias); por estas placas frias pode circular um fluido com temperatura conhecida mais baixa. As temperaturas do equipamento são obtidas pela instalação de termopares onde se queira conhecê-las. Um esquema de montagem da placa quente protegida (forma simétrica), é ilustrado pela Figura 2.1.

De acordo com Moura (1993), o equipamento de placa quente também pode ser utilizado sem o anel de proteção (*unguarded hot-plate*). Neste método, a área de medição compreende toda a área da placa de aquecimento. Em função da não utilização do anel de proteção ocorrem erros devidos às fugas laterais, necessitando utilizar-se fatores de correção no cálculo da condutividade térmica.

Outra maneira de se montar o equipamento placa quente protegida é de forma assimétrica. Neste caso, utiliza-se apenas uma amostra; porém, segundo Moura (1993), esta configuração não é muito utilizada devido à necessidade de utilização de um dispositivo de controle para minimizar o fluxo de calor na direção oposta à amostra.

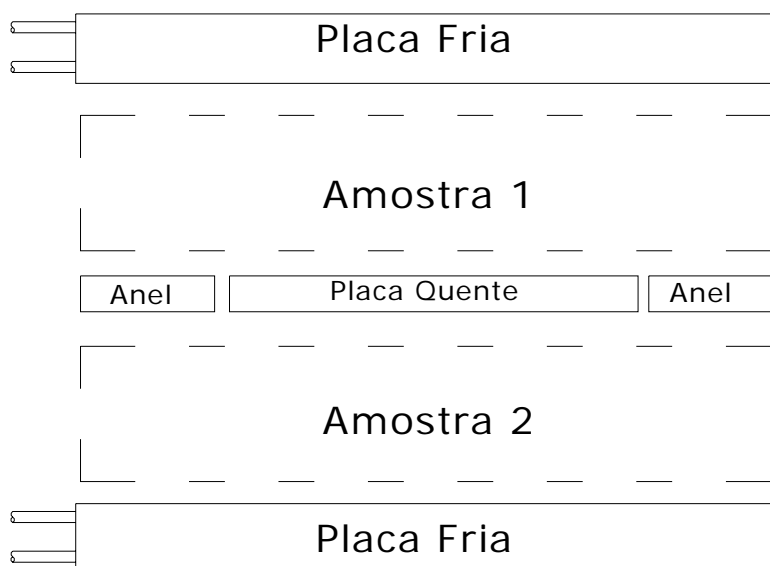


Figura 2. 1. Arranjo geral do equipamento placa quente protegida, montado na forma simétrica.

2.2.2 Análise de erros no método da placa quente protegida

Segundo Güths (1990), muitos problemas presentes neste método ainda não estão suficientemente caracterizados. As Normas Técnicas que tratam deste método possuem recomendações distintas para um mesmo problema. O espaço entre o anel de guarda e a placa central aquecedora é exemplo disso: a Norma ASTM C177 (1985) recomenda que a fenda possua espessura não maior que 4mm ou área não superior a 8% da área da placa central aquecedora. Para o mesmo problema, a Norma francesa ANFOR NF-10 (1972) recomenda distâncias de 1 a 3mm. Já a ISO 8302 (1991) recomenda uma área não superior a 5% da área da placa central aquecedora. No Brasil, o Projeto de Norma 02:135.07-001/4 (2003) recomenda espessuras de 1,5 a 2mm.

De acordo com Philippi et al. (1988), não existe um padrão definido para as dimensões da placa quente protegida. A Norma ANFOR NF-10 (1972) recomenda dimensões de 500x500mm. A Norma BS 874 (1986) recomenda dimensões de 300x300mm

para dispositivos para ensaios em baixas temperaturas e 450x450mm para ensaios em altas temperaturas. Já a Norma ASTM C177 (1985) indica dimensões de 4x4 polegadas (101,6x101,6mm) a 48x48 polegadas (1.219,2x1.219,2mm).

No que diz respeito às amostras para o ensaio, estas devem ser as mais idênticas possíveis, já que para este ensaio utiliza-se um par de amostras. A Norma BSI BS 874 (1986) afirma que as espessuras podem variar de 25 a 50mm. A norma ANFOR NF-10 (1972) expressa as dimensões em função das medidas do dispositivo: não deve ser maior que $0,15 \times d$, onde “d” é o diâmetro (no caso circular) ou aresta da placa central aquecedora. Um cuidado que se deve tomar com relação à amostra é a umidade desta, pois a umidade altera o valor final da condutividade térmica.

As recomendações listadas anteriormente, das diversas Normas Técnicas, visam minimizar possíveis erros nos resultados finais dos ensaios. Segundo De Ponte e Di Filippo (1974), a investigação sobre causas de erro nas medições com a placa quente protegida iniciou-se em 1950, com o trabalho de vários autores como Somers e Cyphers, Dusimberre entre outros. Troussart (1985), através do método de elementos finitos bidimensionais, realizou uma análise dos erros envolvidos nos ensaios realizados por uma placa quente protegida circular.

Troussart (1985) simulou um não balanceamento entre as temperaturas da placa aquecedora principal e do anel de guarda, bem como a sua influência na medição da condutividade para várias espessuras de uma mesma amostra. A seguir são mostrados os resultados obtidos com a simulação de uma amostra de fibra de vidro, sujeita as condições mostradas na Tabela 2.1, e a Figura 2.2 mostram os erros (ϵ) da medição da condutividade térmica. Pode-se ver que ocorre um aumento no erro com a espessura da amostra e com a diferença de temperatura entre a placa central e o anel de proteção. Nota-se também que o erro decresce com o aumento da diferença de temperatura entre as faces da amostra (curva A e B). Troussart (1985) fez simulações para verificar a influência da largura do anel de guarda e testou também materiais diferentes (Alumínio e Cobre) na construção da placa quente, porém os resultados demonstraram uma desprezível influência nos resultados finais.

Tabela 2. 1. Condições associadas a cada curva da Figura 2.2

Curva	Espessura da amostra (mm)	Diferença de temperatura na amostra (K)
A	100	5
B	100	20
C	50	5

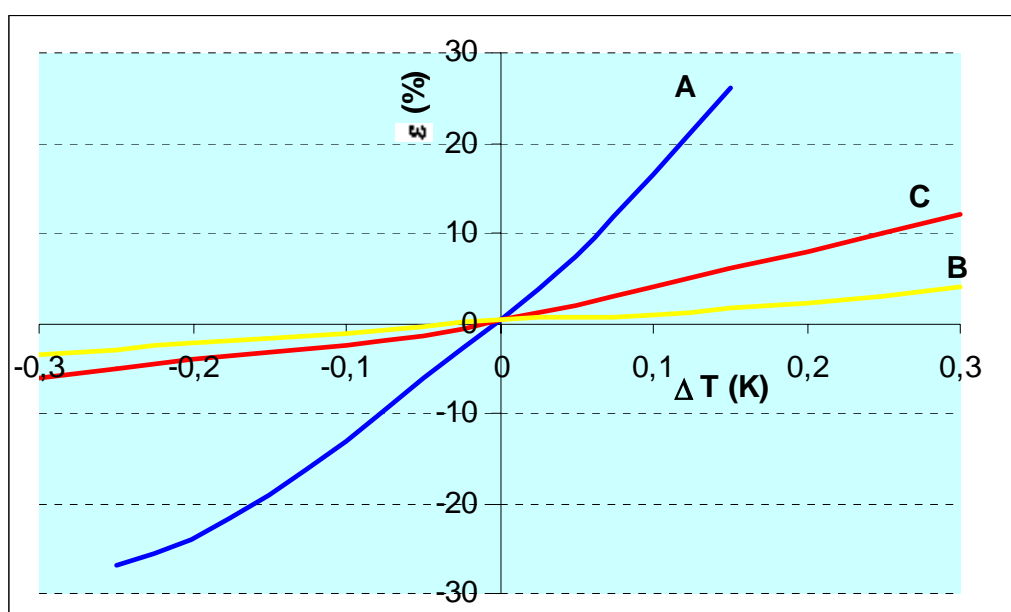


Figura 2. 2. Erros na medição da condutividade térmica em função da espessura da amostra e do desbalanceamento de temperaturas entre o núcleo aquecedor e o anel de guarda.

No mesmo estudo, Troussart (1985) avaliou o erro devido à utilização de termopares em série entre a placa central aquecedora e o anel de guarda. Neste estudo, simularam-se amostras isolantes, onde a condutividade térmica adotada foi igual a 0,042W/mK. A Tabela 2.2 mostra as condições associadas a cada curva da Figura 2.3, onde os resultados são mostrados.

O estudo revelou que o erro aumenta na medida em que também se aumenta o diâmetro e a condutividade térmica do termopar. Por outro lado, ocorre um decréscimo sensível do erro com o aumento da diferença de temperatura entre as faces da amostra. Com base nos resultados, Troussart (1985) recomenda que em ensaios de materiais isolantes ($\lambda=0,045$ W/mK), em amostras com espessura menor que 25mm, submetidas a diferenças de temperaturas maiores que 20 K, se utilizem termopares de diâmetro inferior a 0,2mm.

Tabela 2. 2. Condições associadas a cada curva da Figura 2.3

Curva	Gradiente de temperatura ΔT (K)	Diâmetro do termopar (mm)	Tipo de termopar
A	5	0,3	cobre/constantan
B	5	0,3	cobre/constantan
C	5	0,1	ferro/constantan
D	20	0,1	ferro/constantan

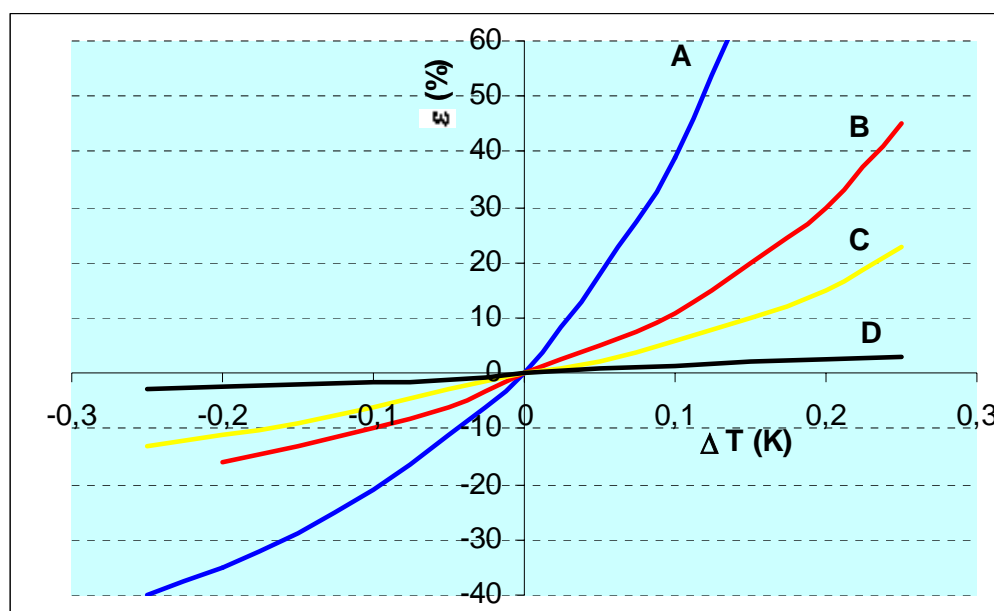


Figura 2. 3. Erro na medição da condutividade em função da diferença de temperatura na amostra e pontes de calor devido a termopares.

Quanto à instalação de termopares para obtenção das temperaturas nas faces da amostra, Philippi et al. (1988) afirmam que é mais prático instalar-se os termopares sobre as placas quente e fria, porém o melhor método é instalar-se os termopares sobre a amostra. Tye e Spinney (1978) realizaram um estudo a este respeito, ensaiando amostras de diferentes condutividades térmicas e com instalações de termopares na amostra e nas placas. A Figura 2.4 mostra os resultados deste estudo. Uma das principais conclusões é que em amostras com condutividade térmica superior a 0,3 W/mK, os termopares devem ser dispostos preferencialmente sobre a amostra, caso contrário podem ocorrer erros significativos nos resultados finais do experimento.

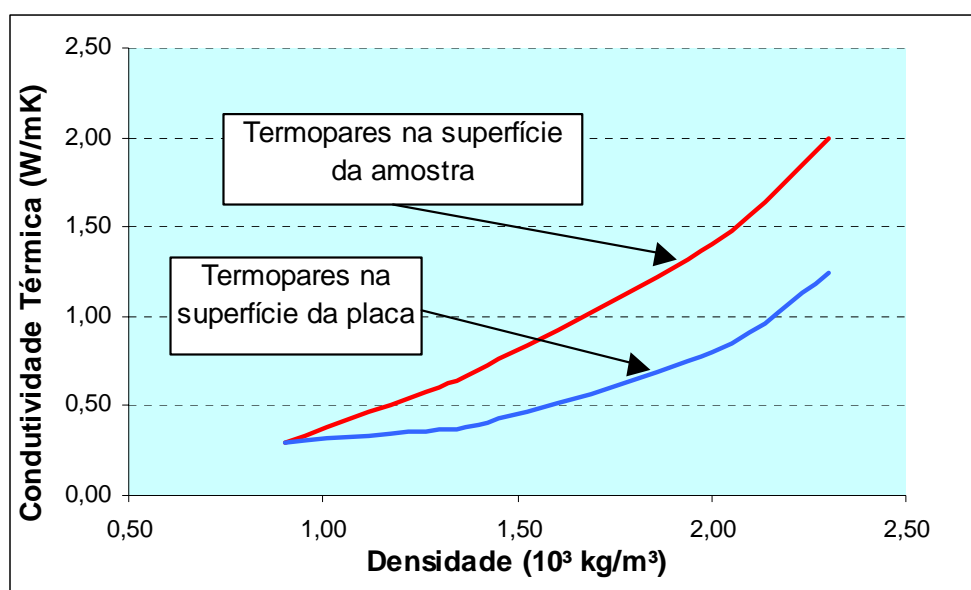


Figura 2. 4. Influência da instalação de termopares na condutividade térmica.

Zarr e Filliben (2002) apresentam um estudo interlaboratorial realizado com o objetivo de identificar variações nos resultados da medição da condutividade térmica utilizando o dispositivo placa quente protegida. Participaram do estudo cinco laboratórios: O *National Research Council Canadá* (NRCC), o *Laboratoire National d'Essais* (LNE), o *Japan Testing Center for Construction Materials* (JTCCM), o *National Physical Laboratory* (NPL) e o *National Institute of Standards and Technology* (NIST). O estudo solicitou a cada

laboratório que efetuasse cinco medições em cada uma das quatro amostras de materiais que lhes foram enviadas. A única variável em questão era o dispositivo, pois cada laboratório tinha uma placa quente diferente dos demais. O dispositivo do NPL tinha dimensões de 610x610mm, ao passo que a do JTCCM possuía dimensões de 300x300mm. A placa quente do NIST tinha formato circular com diâmetro de 1016mm. As medições foram efetuadas a uma temperatura média do conjunto de 24°C. Como resultado, encontraram-se desvios desprezíveis na condutividade, em torno de 1,5%, ou seja, a configuração (dimensões e formas) do equipamento não possui grande influência no resultado final da condutividade térmica; o importante é garantir um fluxo estacionário e perpendicular às amostras, para se ter bons resultados nos experimentos.

Salmon e Tye (2001), do *National Physical Laboratory* (NPL) da Inglaterra, organizou um estudo semelhante ao apresentado anteriormente, porém envolvendo empresas situadas no Reino Unido e Irlanda. O estudo comparou os resultados de condutividade térmica obtidos pelo método da placa quente protegida e do transdutor de fluxo de calor (fluximétrico), que será abordado no próximo item. O estudo usou como referência a condutividade térmica obtida pelos dispositivos do NPL. Cada empresa que participou do estudo recebeu amostras de três materiais: Poliestireno expandido (EPS), poliestireno extrudado (EXPS) e fibra mineral (MFB). Participaram deste estudo, sete empresas nos ensaios da placa quente protegida e dezessete empresas nos ensaios com o método do fluxímetro. Compararam-se os resultados para duas espessuras diferentes de cada amostra. Utilizaram-se espessuras da ordem de 30mm e de 50mm (finas e espessas).

O estudo de Salmon e Tye (2001) revelou que, para o caso da placa quente protegida, ensaiando-se amostras espessas, encontraram-se valores que diferiam em até 6,5% (caso extremo) em relação ao encontrado no NPL. Já nos ensaios de amostras finas o desvio foi menor, chegando a um valor máximo de 2,7%. As Figuras 2.5 e 2.6 mostram os desvios encontrados em cada laboratório (de 1 a 6), para cada amostra em relação aos valores do NPL. Nota-se na Figura 2.6 que os laboratórios 3 e 5 não apresentaram resultados para amostras finas. Os laboratórios 4 e 6 apresentaram os maiores desvios nos dois casos.

De maneira geral, o estudo obteve valores de condutividade maior para as amostras espessas. Isso reforça as constatações de Troussart (Figura 2.2), que o erro aumenta na

medida em que se aumenta a espessura do material ensaiado. No estudo do NPL este efeito é chamado de *thickness effect* (efeito da espessura).

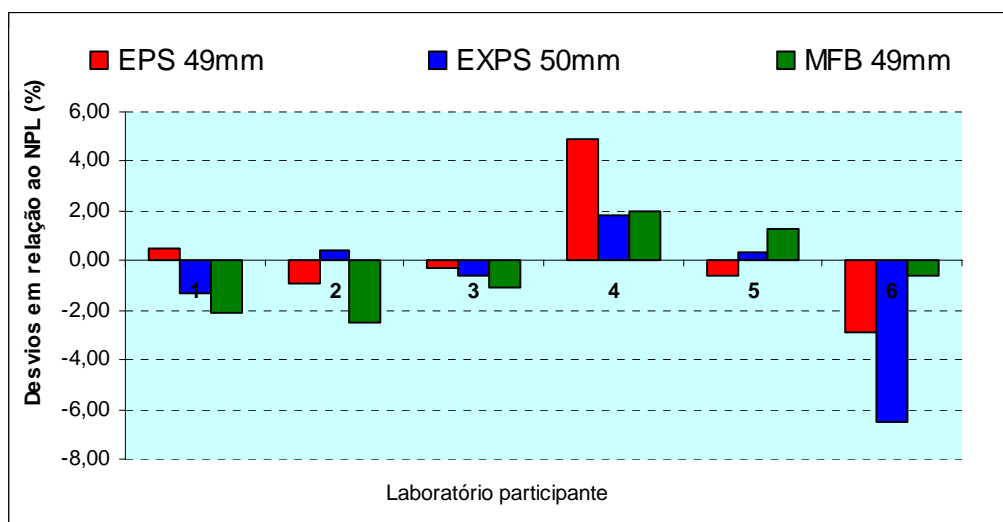


Figura 2. 5. Desvios dos resultados em relação aos valores do NPL nas medições com a placa quente protegida em amostras espessas.

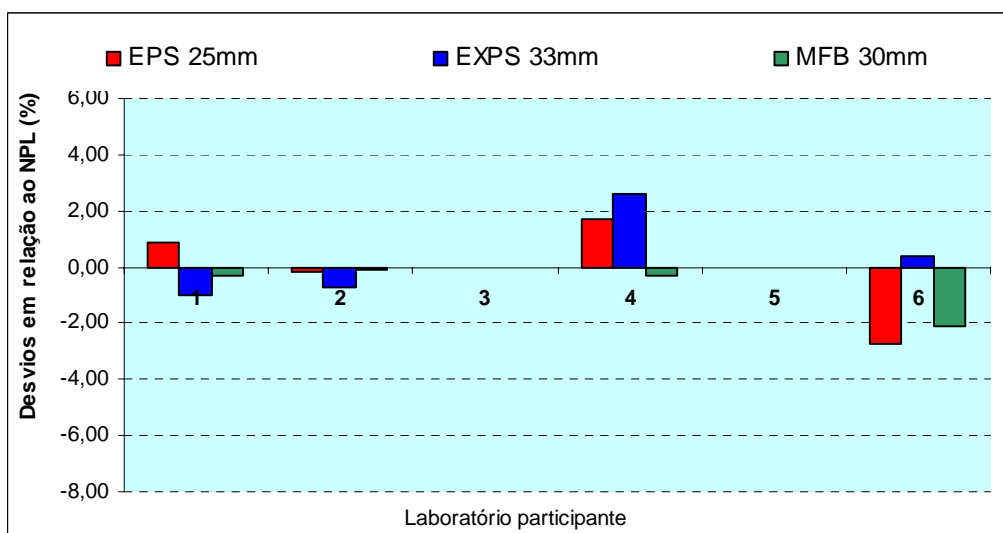


Figura 2. 6. Desvios dos resultados em relação aos valores do NPL nas medições com a placa quente protegida em amostras finas.

2.3 MÉTODO FLUXIMÉTRICO

2.3.1 Princípio do método e características do equipamento

Segundo Güths (1990), com o surgimento de novos tipos de isolamentos térmicos, na década de 60, sentiu-se a necessidade de desenvolver métodos mais simples e rápidos de medição da condutividade térmica, para se utilizar no meio industrial. A confecção de duas amostras idênticas e o alto tempo demandado para se atingir regime permanente dificulta a aplicação do método da placa quente protegida nas indústrias. Neste cenário, surge um método alternativo de medição de condutividade térmica pelo princípio do fluxímetro, o método fluximétrico.

O método do fluxímetro é um método secundário para medição de condutividade térmica, onde o regime permanente é atingido mais rapidamente que no caso da placa quente protegida. Secundário porque os fluxímetros devem ser periodicamente calibrados, já que estes dispositivos medem fluxo de calor. Normalmente, a calibração destes dispositivos se dá pela submissão dos mesmos a um fluxo de calor conhecido.

De acordo com Güths (1990), este método tem operação mais simplificada que o da placa quente protegida e o equipamento é mais simples. Moura (1993) afirma que em ensaios com a placa quente protegida, o tempo para se atingir regime permanente é de aproximadamente 25 a 30 horas, ao passo que no método fluximétrico o regime permanente é atingido em aproximadamente duas horas.

A Figura 2.7 mostra três formas de montagem do equipamento. Todas as montagens utilizam uma placa quente e uma placa fria. A montagem (a) utiliza somente uma amostra e um fluxímetro. Na montagem (b), que é a mais utilizada no LPMT, é ensaiada apenas uma amostra usando dois fluxímetros, já a montagem (c) utiliza um fluxímetro, porém exige a confecção de duas amostras idênticas, recaindo no problema do método da placa quente protegida.

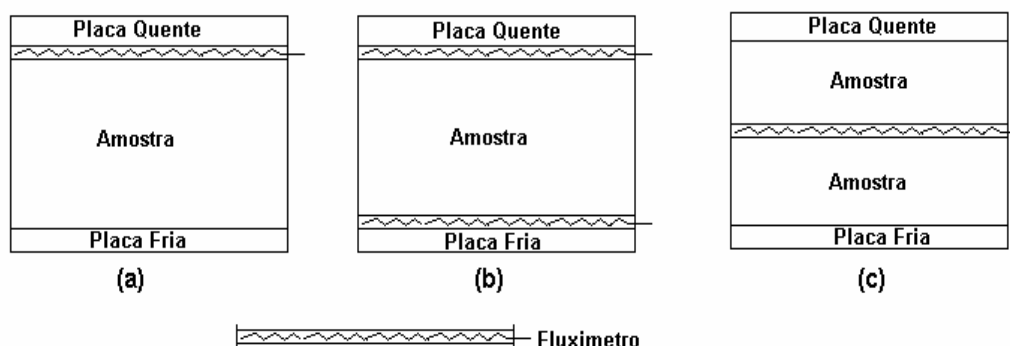


Figura 2. 7. Arranjos possíveis para o método fluximétrico.

O princípio do método fluximétrico é a submissão da amostra a um fluxo de calor, gerado por uma resistência aquecedora alimentada por uma fonte de tensão regulável. Imaginado-se o arranjo (b) da Figura 2.7, a resistência aquecedora dissipa calor na placa quente, que tem a função de distribuir uniformemente o calor em toda a sua área, transformando-se numa superfície isotérmica. Todo o calor gerado pela resistência aquecedora atravessa o primeiro transdutor, na sequência a amostra, e depois o segundo transdutor e é retirado pela placa fria, por onde pode circular um fluido de temperatura conhecida mais baixa.

Os fluxímetros medem o fluxo de calor que os atravessa, que é o mesmo que atravessa a amostra, considerando que não ocorram fugas laterais. Desta forma, o fluxo de calor que atravessa a amostra é obtido sem a necessidade de se conhecer a potência injetada, como no caso da placa quente protegida. Conhecendo-se a área da amostra, a espessura, o fluxo de calor que atravessa a amostra e medindo-se as temperaturas das faces da mesma, obtém-se através da Lei de Fourier, a condutividade térmica da amostra.

Segundo Güths (1990), utiliza-se como área de medição, a área central do transdutor, pois se imagina que nas áreas periféricas, ocorram fugas de calor e numa área mais central, as linhas de fluxo sejam unidimensionais conforme a Figura 2.8. Desta forma, pode-se considerar que todo o fluxo que atravessa a parte central do transdutor superior atravessa também o transdutor inferior sendo, portanto, o mesmo fluxo que atravessa a amostra disposta entre os dois transdutores.

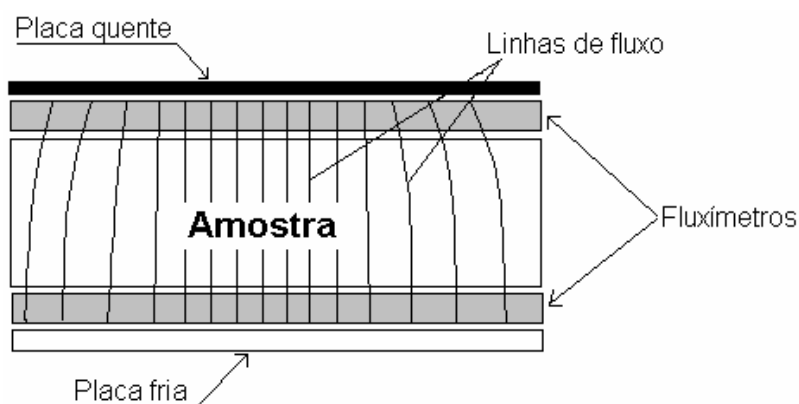


Figura 2. 8. Hipótese de distribuição das linhas de fluxo de calor

A norma ISO 8301 (1991), a americana ASTM C518 (1985), a inglesa BSI BS 874 (1986) e a francesa NF T56 – 124 (1991) tratam do método fluximétrico para medição da condutividade térmica em regime permanente. No Brasil, está em fase de publicação o Projeto de Norma 02:135.07-001/5 (2003), que regulamentará o método fluximétrico.

2.3.2 Análise de erros no método fluximétrico

Um estudo interlaboratorial organizado e realizado por Zarr e Lagergren (1999) - pesquisadores do NIST nos Estados Unidos - envolveu 13 laboratórios situados naquele país e no Canadá, com o objetivo de avaliar a precisão e as tendências do método de ensaio normatizado pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM) C 518 (1985), que trata do método fluximétrico para determinação da condutividade térmica em regime permanente.

Para tal, foram confeccionadas três amostras de fibra de vidro de alta densidade, nas quais os laboratórios participantes deveriam efetuar as medições de condutividade térmica. Todas as medições foram efetuadas a uma temperatura média de 75°F (23,9°C) em fluxímetros com dimensões de 12x12 polegadas (305x305mm). As amostras tinham as dimensões do fluxímetro e espessura de 1 polegada (25,4mm). Com a amostra nº1

efetuaram-se calibrações nos equipamentos dos diversos laboratórios; a amostra nº 2 não possuía espaçador para limitar a espessura no momento do teste, já que a fibra de vidro é um material compressível, e a amostra nº 3 possuía espaçador com condutividade térmica conhecida. Com isso, pode-se também verificar a influência do espaçador no valor da condutividade térmica medida.

Os resultados obtidos nos 13 laboratórios foram comparados com o valor de condutividade térmica medida pelo equipamento de placa quente protegida do NIST. Os valores obtidos com a placa quente protegida do NIST são mostrados na Figura 2.9; foram efetuadas quatro medições para cada amostra, na faixa de temperatura de 23,9°C. Percebe-se que no caso da amostra com espaçador, a condutividade térmica medida é ligeiramente maior. Os valores médios de condutividade térmica são iguais a 0,03263 e 0,03287W/mK para as amostras 2 e 3, respectivamente. A diferença entre os valores médios das amostras 2 e 3 foi de 0,75%.

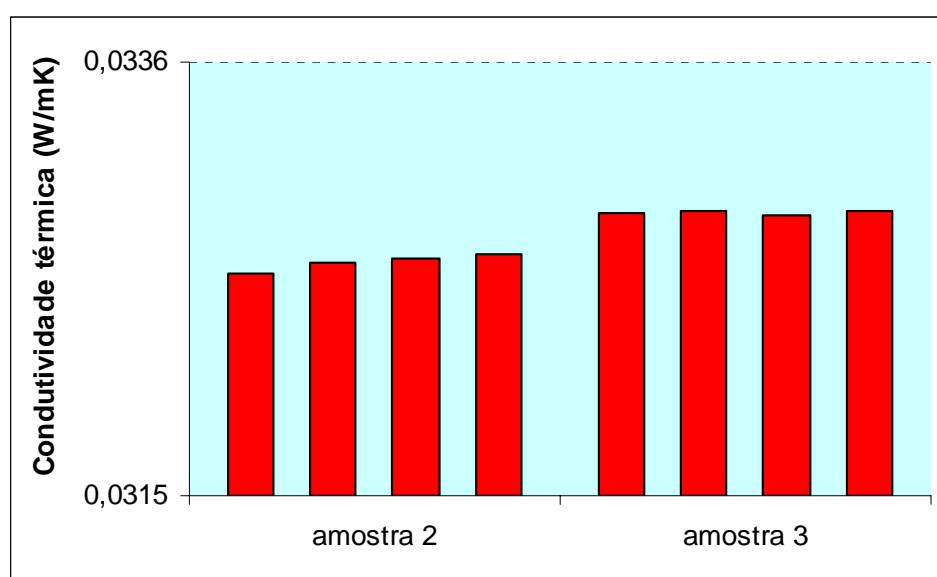


Figura 2. 9. Valores de condutividade térmica obtidos na placa quente protegida do NIST para amostras de fibra de vidro de alta densidade.

A Figura 2.10 mostra os desvios obtidos em cada laboratório em relação aos valores médios obtidos da placa quente do NIST para as duas amostras testadas. O desvio máximo na amostra 2 é de 2,88% (laboratório 2), ao passo que para a amostra 3 o máximo desvio é de 2,04% (laboratório 1). Os autores deste estudo realizaram um tratamento estatístico nos valores fornecidos pelos 13 laboratórios, porém um dos laboratórios (laboratório 13) não efetuou as medições conforme o NIST solicitou e foi excluído da análise estatística.

O tratamento estatístico consiste em avaliar os desvios entre os valores medidos em cada um dos três testes realizados nas duas amostras, bem como os desvios entre os valores médios entre os laboratórios participantes. A análise estatística foi realizada segundo a ASTM Practice E 691 (1999), que trata da precisão de dados obtidos em estudos interlaboratoriais. Segundo os autores deste estudo, nenhum dos desvios, tanto entre laboratórios quanto entre as três medidas efetuadas em cada amostra estão fora dos valores recomendados pela ASTM Practice E 691 (1999).

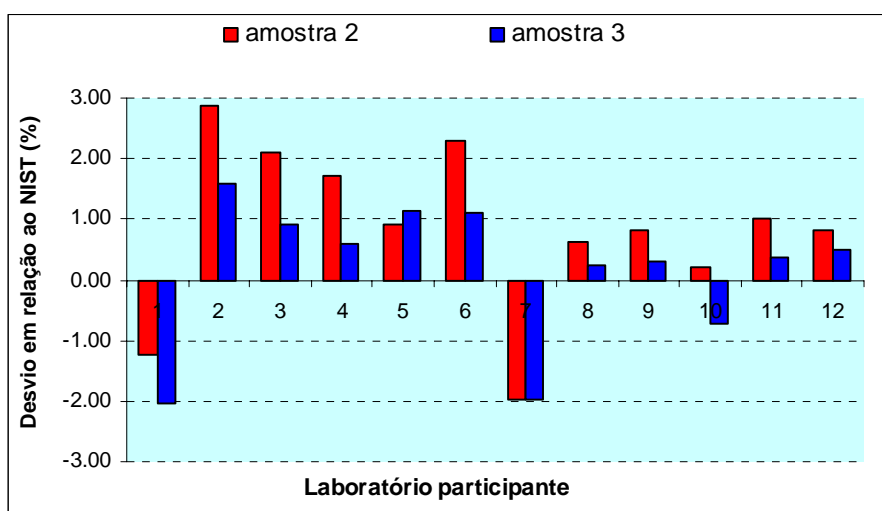


Figura 2. 10. Desvios dos resultados em relação aos valores obtido na placa quente protegida do NIST.

O estudo de Salmon e Tye (2001), do *National Physical Laboratory* (NPL) da Inglaterra, abordado no item 2.2.2, comparou também dezessete empresas situadas no Reino Unido e Irlanda, que realizam ensaios de condutividade térmica com o método

fluximétrico. Os resultados obtidos foram comparados com valores encontrados no equipamento fluximétrico do NPL. Ensaíram-se amostras de poliestireno expandindo (EPS), poliestireno extrudado (EXPS) e lã de rocha (RW), em amostras finas e espessas. Os desvios nos resultados dos ensaios em relação aos valores do NPL, para amostras espessas e finas são mostrados nas Figuras 2.11 e 2.12, respectivamente.

Os desvio máximo para amostras espessas foi de 6,78% (laboratório 8); já para amostras finas, o maior desvio foi de 5,80% (laboratório 6). O estudo constatou que os desvios em relação aos valores padrão do NPL são maiores no caso do método fluximétrico do que no caso da placa quente protegida, chegando a valores de até 6,78% em ensaios com amostras espessas.

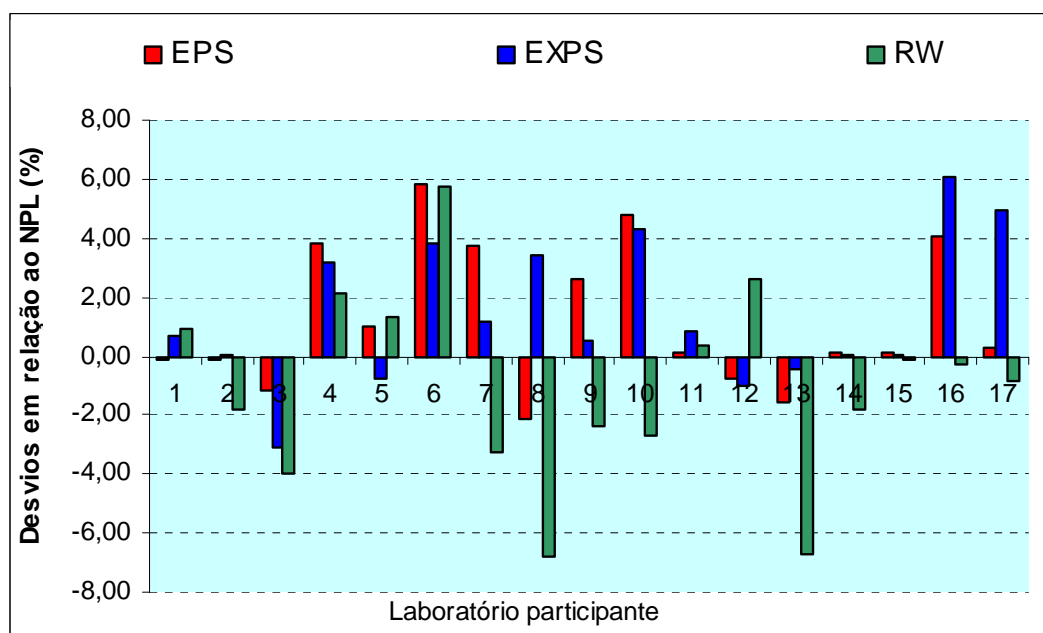


Figura 2. 11. Desvios dos resultados em relação aos valores do NPL nas medições com fluxímetros em amostras espessas.

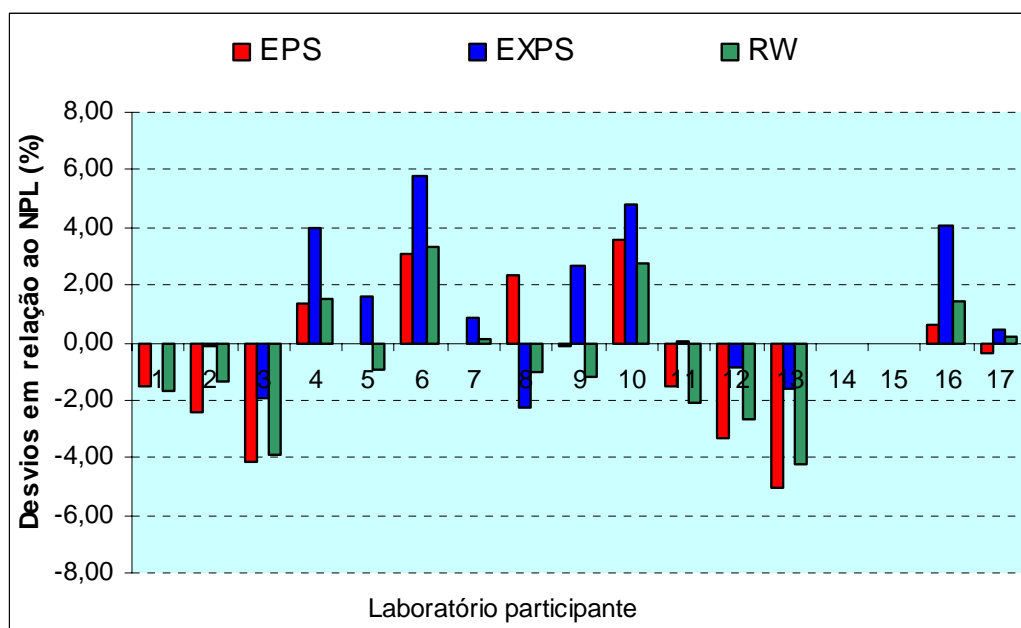


Figura 2. 12. Desvios dos resultados em relação aos valores do NPL nas medições com fluxímetros em amostras finas.

2.3.3 Alguns tipos de fluxímetros

Segundo Güths e Nicolau (1998) existem basicamente dois tipos de fluxímetros: i) fluxímetros a gradiente transversal e ii) fluxímetros a gradiente tangencial.

Nos fluxímetros a gradiente transversal, como o próprio nome já diz, a medição da diferença de temperatura é obtida num plano transversal ao plano de medição do fluxo de calor (Figura 2.13). Os tipos principais de fluxímetros a gradiente transversal são: i) do tipo espira (Figura 2.14a) e ii) do tipo termopilha (Figura 2.15b). Os fluxímetros a gradiente transversal apresentam uma espessura normalmente de 5mm, que pode ser considerada elevada segundo Güths e Nicolau (1998), perturbando de maneira significativa a medição do fluxo de calor.

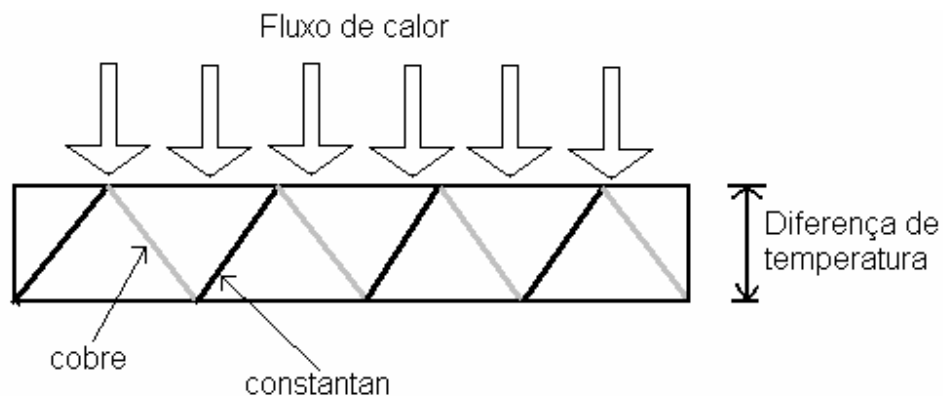


Figura 2. 13. Esquema de um fluxímetro a gradiente transversal

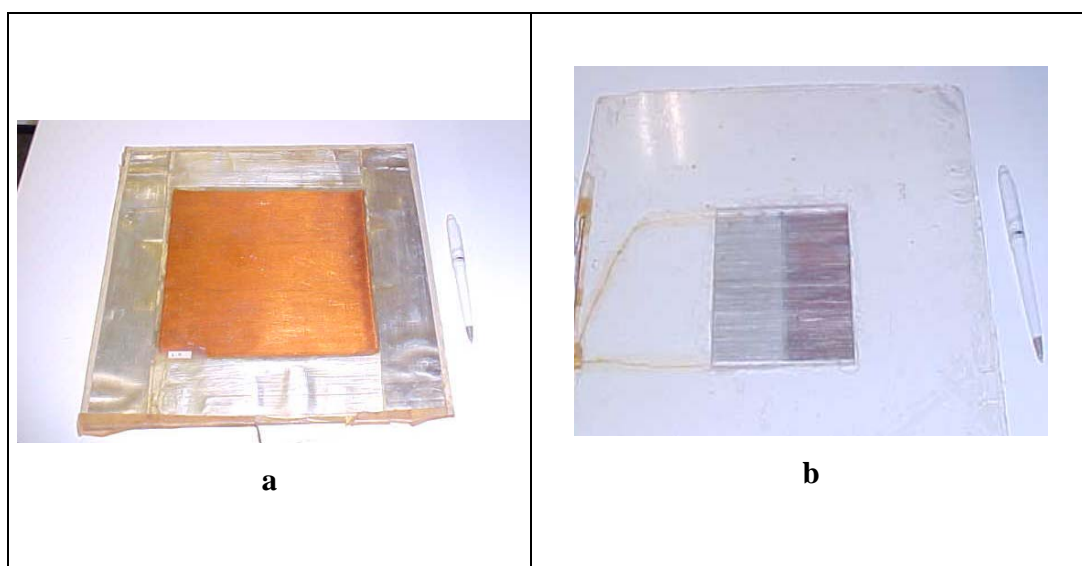


Figura 2. 14. Exemplos de fluxímetros a gradiente transversal do tipo espira e tipo termopilha.

O princípio de funcionamento dos fluxímetros a gradiente tangencial, segundo Güths e Nicolau (1998), consiste em desviar as linhas de fluxo de calor de modo a se gerar uma diferença de temperatura num plano tangencial ao plano de medição. O desvio dos fluxos é ocasionado pelo contato pontual da superfície isotérmica superior e a parede auxiliar, ocasionando um curto circuito térmico. Desta forma, a diferença de temperatura é lida num plano tangencial ao plano de medição do fluxo de calor, como mostrado na Figura 2.15. Na Figura 2.16 é mostrado um exemplo de um fluxímetro a gradiente tangencial.

Segundo Güths e Nicolau (1998), os fluxímetros a gradiente tangencial apresentam pequena espessura (em torno de $300\mu\text{m}$) e alta sensibilidade de leitura.

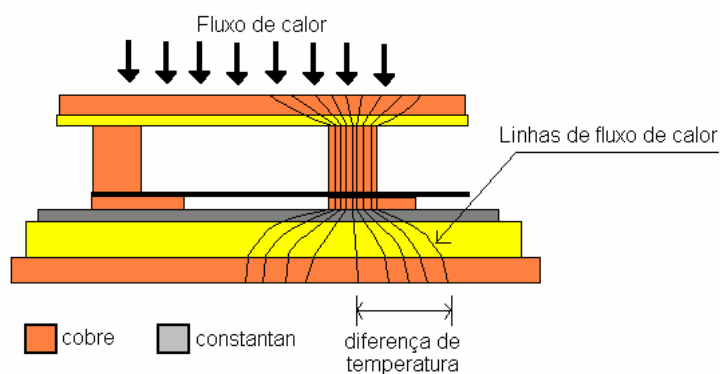


Figura 2. 15. Corte transversal no fluxímetro a gradiente tangencial.



Figura 2. 16. Exemplo de transdutor a gradiente tangencial.

2.4 MÉTODO DA LINHA FONTE OU FIO QUENTE

Segundo Philippi et al. (1988), este método se aplica a materiais homogêneos nas fases sólida ou líquida. É um método especialmente usado para medir condutividade térmica de materiais úmidos. Utiliza-se uma sonda cilíndrica, que é inserida no meio para o qual se

deseja medir a condutividade térmica; calor é dissipado numa resistência elétrica que está inserida no interior da sonda e então mede-se a evolução da temperatura com o tempo através de um termopar. Através de um modelo matemático mostrado em Philippi et al. (1988), obtém-se a condutividade térmica do material ensaiado. O esquema do experimento é mostrado na Figura 2.17.

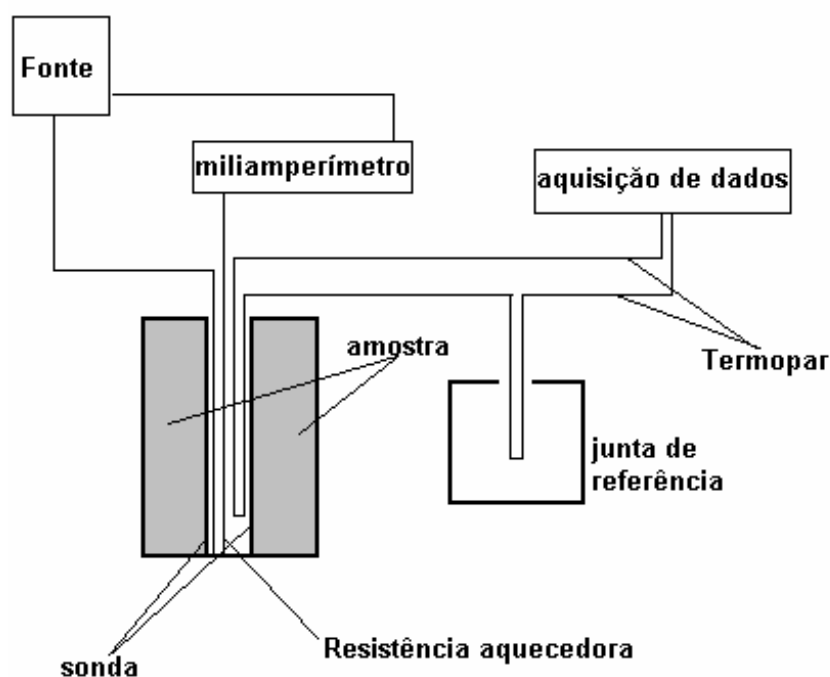


Figura 2. 17. Arranjo experimental do método da Linha Fonte.

A Norma Técnica ABNT 12820 (1993) trata da determinação da condutividade térmica de concretos endurecidos. O experimento normatizado é semelhante ao método da linha fonte. A Equipe de Furnas – Departamento de Apoio e Controle Técnico, realizou ensaios de condutividade térmica em concretos utilizando a referida Norma Técnica.

Segundo Equipe Furnas (1997), o experimento para determinação da condutividade térmica é realizado através de equipamento semelhante ao esquematizado na Figura 2.17. A condutividade térmica do corpo-de-prova de concreto (Figura 2.18) é determinada introduzindo-se calor no orifício central e mantendo-se a superfície externa

deste a uma temperatura conhecida mais baixa. O equipamento é projetado para produzir um fluxo de calor uniforme e unidirecional através do corpo-de-prova.



Figura 2. 18. Corpo-de-prova utilizado para medições de condutividade térmica.

Fonte: Equipe Furnas (1997).

2.5 MÉTODO DO CALORÍMETRO A ÁGUA

De acordo com Moura (1993), neste método a área de medição é a placa fria (Figura 2.19). Medem-se as temperaturas de entrada e saída do fluido que refrigera a placa fria. Através da capacidade térmica por unidade de volume, calcula-se o fluxo de calor através das amostras.

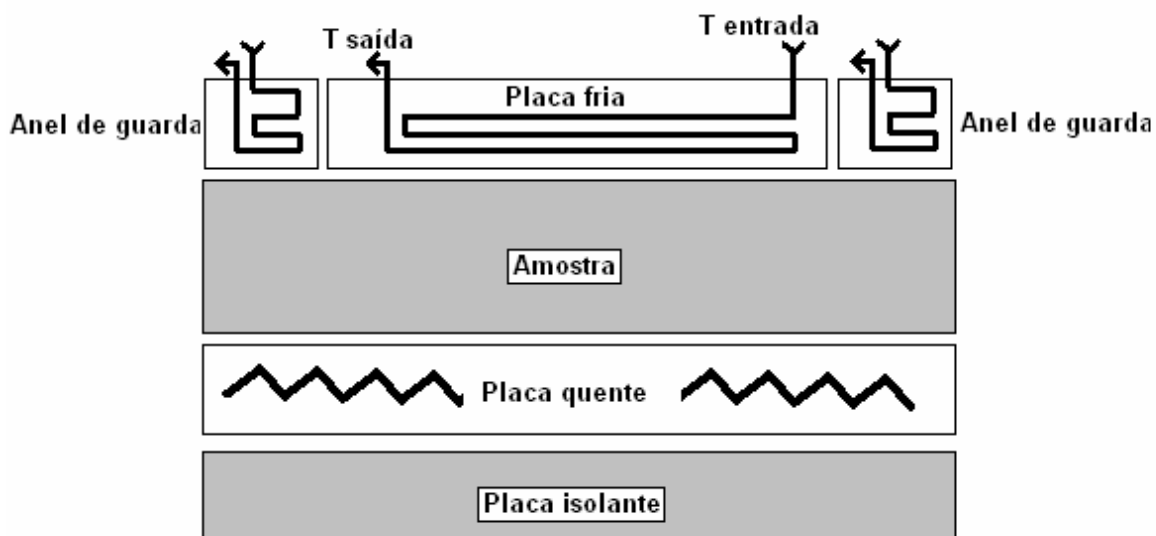


Figura 2. 19. Esquema do experimento do método calorímetro a água.

2.6 MÉTODO DO DISCO QUENTE

Segundo Moura (1993), o método do disco quente (*hot-disc*) é empregado para a determinação da condutividade térmica de materiais como plásticos sólidos e vidros com espessuras entre 3 e 25mm, com diâmetros superiores a 75mm.

Quando as amostras são lâminas (espessuras finas) as perdas laterais são baixas. Entretanto, este equipamento necessita ser calibrado com amostras de condutividade térmica conhecida, pois não possui anel de guarda.

2.7 MÉTODO DO TUBO QUENTE

Segundo Moura (1993), o método do tubo quente (*hot-pipe*) é utilizado para medição da condutividade térmica de isolantes para tubulações, os quais geralmente têm forma de cilindros vazados.

O equipamento (Figura 2.20) é composto por uma área central cilíndrica responsável pelo aquecimento, confinada por duas áreas laterais de guarda que assegura um

fluxo radial através da seção de medição. A condutividade térmica é determinada através da medição da potência dissipada no aquecedor central e das temperaturas das faces quente e fria da amostra.

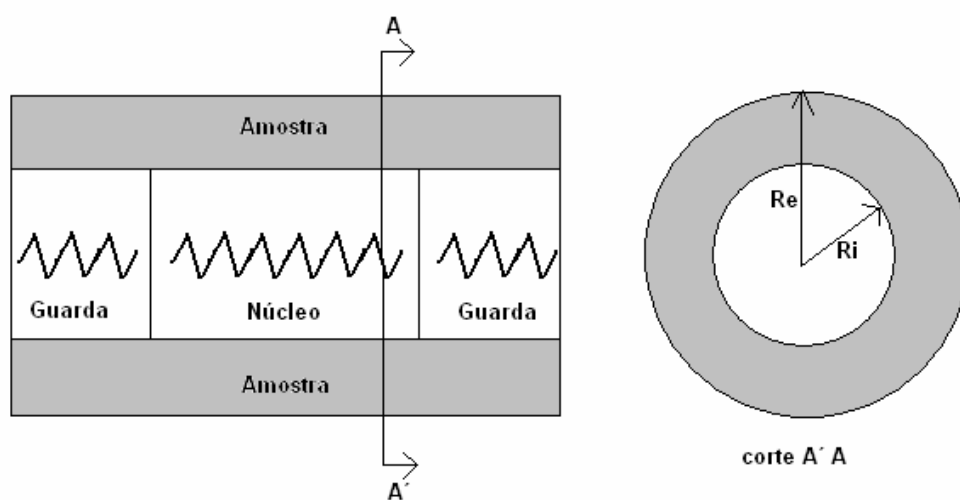


Figura 2.20. Esquema do método do tubo quente.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

3.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo divide-se em quatro partes: i) ensaios de termografia, ii) utilização do método fluximétrico, iii) modelagem matemática do experimento que utiliza o método fluximétrico e iv) medições pós-simulação.

A primeira parte trata dos ensaios de termografia realizados na resistência aquecedora que foi utilizada no método fluximétrico. São apresentados o equipamento e todos os procedimentos adotados na realização deste ensaio.

A segunda parte trata da utilização do método fluximétrico. Apresenta-se o equipamento do LMPT dando especial atenção às características dos fluxímetros a gradiente tangencial fabricados no laboratório. Apresentam-se os procedimentos adotados para a calibração e para a medição da condutividade térmica com o referido equipamento.

A terceira parte trata da modelagem matemática realizada a fim de caracterizar as fugas de calor ocorridas no método fluximétrico. Apresentam-se os procedimentos adotados na modelagem, o programa computacional adotado para resolução das equações e as situações simuladas.

A quarta parte trata das medições efetuadas após as simulações computacionais através do modelo matemático.

3.2 ENSAIOS DE TERMOGRAFIA

3.2.1 O equipamento utilizado

Para verificar a distribuição de calor na resistência aquecedora utilizada no método fluximétrico, optou-se por utilizar uma técnica de termografia. A inspeção termográfica, é uma técnica não destrutiva que utiliza os raios infravermelhos, para medir temperaturas ou

observar padrões diferenciais de distribuição de temperatura, com o objetivo de propiciar informações relativas à condição operacional de um componente, equipamento ou processo. O equipamento – que é semelhante a uma câmera fotográfica - capta a radiação emitida pela superfície analisada. Como resultado obtém-se uma gravura mostrando os campos de temperatura superficial. O equipamento utilizado pertence ao Laboratório de Combustão e Sistemas Térmicos (LabCET) da UFSC e é mostrado na Figura 3.1.



Figura 3. 1. Equipamento de termografia utilizado nos ensaios.

3.2.2 Os procedimentos adotados nos ensaios

Primeiramente colocou-se a resistência aquecedora sobre uma manta isolante com o objetivo de evitar as perdas de calor para a bancada na qual o experimento foi realizado. Posteriormente, conectou-se a resistência aquecedora a uma fonte de tensão regulável a fim de fornecer a potência necessária até o aquecimento. Num intervalo de tempo de 5 segundos o equipamento de termografia registrava o aquecimento da resistência aquecedora até que o regime permanente se estabelecesse. O regime permanente foi considerado atingido quando se observou variações inferiores a 1% na temperatura média da resistência aquecedora. Como o objetivo principal deste ensaio era verificar qualitativamente a distribuição de temperaturas ao longo da resistência aquecedora, não se utilizou nenhuma Norma Técnica para ensaios deste gênero. A Figura 3.2 mostra a montagem do experimento de termografia.



Figura 3. 2. Experimento de termografia efetuado na resistência aquecedora.

3.3 UTILIZAÇÃO DO MÉTODO FLUXIMÉTRICO

O método fluximétrico será utilizado para medição da condutividade térmica de amostras de poliestireno expandido e vidro. Escolheu-se o poliestireno expandido e o vidro por representarem dois grupos de materiais de construção: isolantes e condutores, respectivamente. Serão efetuadas medições em amostras de dimensões 100x100mm, com espessuras de 10 e 20mm de cada material. A espessura de 20mm é atingida, dispondo-se de forma justaposta duas amostras de 10mm. As amostras de vidro terão a colocação de pasta térmica na interface entre as duas amostras de modo a minimizar a resistência térmica de contato. As densidades aparentes dos materiais são de aproximadamente 2400 e 62kg/m³ para o vidro e poliestireno expandido, respectivamente.

3.3.1 Fluxímetros a gradiente tangencial utilizados no experimento

Os fluxímetros utilizados no experimento medem fluxo de calor nas regiões central e periférica separadamente, bem como temperatura em um ponto central. A Figura 3.3 mostra o esquema construtivo e os sensores do fluxímetro a gradiente tangencial do LMPT.

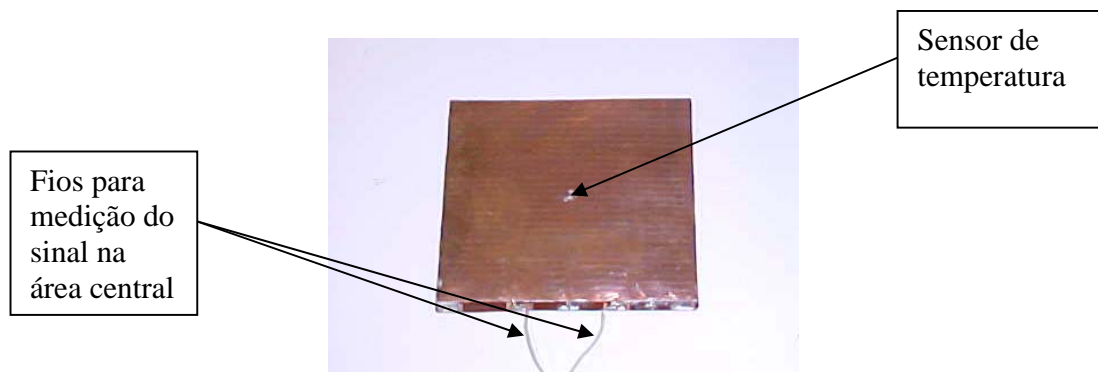


Figura 3. 3. Fluxímetro a gradiente tangencial utilizado no experimento.

A resistência aquecedora utilizada no método fluximétrico é construída com a técnica de circuitos impressos depositados em kapton. A Figura 3.4 mostra a resistência aquecedora utilizada no método fluximétrico. Esta resistência aquecedora apresentou uma resistência elétrica de 9,64 Ohms.

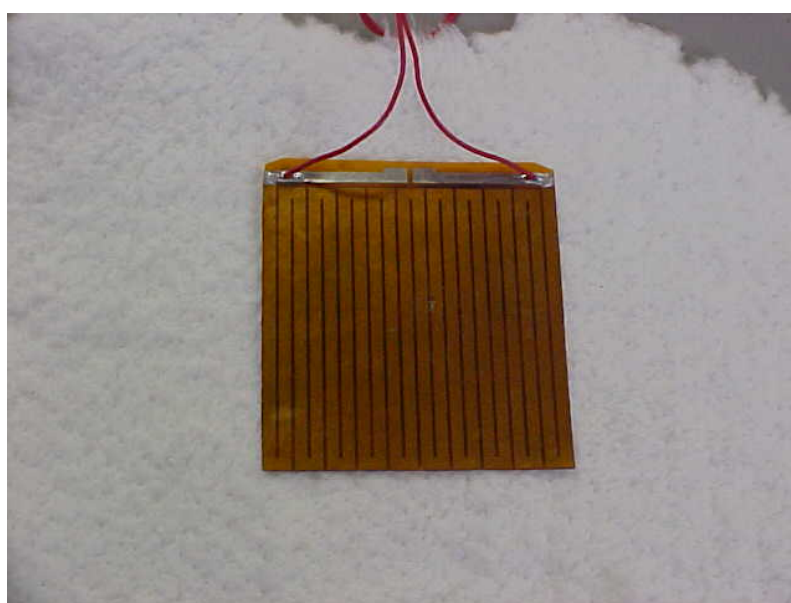


Figura 3. 4. Resistência aquecedora utilizada no método fluximétrico.

3.3.2 Calibração dos fluxímetros a gradiente tangencial

Antes de serem utilizados, os fluxímetros necessitam de uma calibração. Para tal, existem dois métodos: i) método simultâneo e ii) método do fluxímetro auxiliar. Segundo Güths e Nicolau (1998), o primeiro método é de difícil execução, já o segundo é mais prático e gera bons resultados. Os fluxímetros utilizados nas medições deste trabalho foram calibrados de acordo com o método do fluxímetro auxiliar.

O método do fluxímetro auxiliar, requer a calibração de um fluxímetro que será usado na calibração dos demais fluxímetros. Escolheu-se um fluxímetro “inteiro”, ou seja, toda a área do fluxímetro gera somente um sinal que será convertido, utilizando a respectiva constante de calibração, em fluxo de calor.

Para a calibração do fluxímetro auxiliar uma montagem semelhante à representada pela Figura 3.5 foi efetuada. Uma potência conhecida é dissipada na resistência aquecedora, para tal é utilizada uma fonte de tensão-corrente regulável e a resistência elétrica da resistência aquecedora é medida por um multímetro de alta sensibilidade. Considera-se que 95% da potência dissipada na resistência aquecedora atravessa o fluxímetro e os 5% restantes são fugas. Utiliza-se a Equação 3.1 para obter a constante de calibração do fluxímetro auxiliar.

$$c_{auxiliar} = 0,95 \frac{R.i^2}{A.V} \quad (3.1)$$

onde:

- $c_{auxiliar}$ é constante de calibração do fluxímetro auxiliar, em $\frac{W}{m^2 \mu V}$;

- R é a resistência elétrica da resistência aquecedora, em Ω (Ohms);
- i é a corrente que circula pela resistência aquecedora, em A (Ampéres);
- A é a área do fluxímetro, em m^2 ;
- V é o sinal proveniente do fluxímetro, em μV .



Figura 3. 5. Esquema de montagem para calibração do fluxímetro auxiliar.

A placa fria utilizada na calibração é a mesma que será utilizada nas medições. A placa é construída em duralumínio e possui aletas de dissipação de calor para o ar ambiente. Até o presente momento o LMPT não utiliza placa refrigerada por fluido (água gelada, por exemplo), para ensaios com o método fluximétrico.

Uma vez calibrado o fluxímetro auxiliar, é necessário calibrar os fluxímetros que serão utilizados nas medições de condutividade térmica. Para tanto, uma montagem semelhante à da Figura 3.6 foi efetuada. Os fluxímetros que serão utilizados nas medições de condutividade térmica possuem duas áreas sensíveis independentes: i) área central e ii) área lateral. Porém, somente a área central é considerada no cálculo da condutividade térmica.



Figura 3. 6. Esquema de calibração dos fluxímetros A e B.

No experimento de calibração, uma potência conhecida é dissipada na resistência aquecedora. Parte do fluxo de calor originado pela dissipação desta potência atravessará o fluxímetro que está sendo calibrado e as fugas serão medidas pelo fluxímetro auxiliar (pré-calibrado). Efetuaram-se medições com duas diferentes potências (8 e 10W) aplicadas na resistência aquecedora, e aplicando-se a Equação 3.2 obtêm-se a constante de calibração dos fluxímetros. Como os fluxímetros apresentam áreas sensíveis periférica e central, efetuaram-se calibrações em ambas as áreas.

$$c = \frac{\left(\frac{R \cdot i^2}{A} \right) - V_{\text{auxiliar}} \cdot c_{\text{auxiliar}}}{V} \quad (3.2)$$

onde:

- c é a constante de calibração do fluxímetro, em $\frac{W}{m^2 \mu V}$;
- R é a resistência elétrica da resistência aquecedora, em Ω (Ohms);
- i é a corrente elétrica que atravessa a resistência aquecedora, em A;
- A é a área do fluxímetro, em m^2 ;
- V_{auxiliar} é o sinal proveniente do fluxímetro auxiliar, em μV ;
- c_{auxiliar} é a constante de calibração do fluxímetro auxiliar, em $\frac{W}{m^2 \mu V}$;
- V é o sinal proveniente do fluxímetro que está sendo calibrado, em μV .

Também foi realizada uma verificação da incerteza de medição dos fluxímetros em função do erro aleatório. Para o cálculo da incerteza utilizou-se somente o fluxímetro A. Efetuaram-se duas medições com cada uma das quatro potências diferentes na resistência aquecedora. As potências foram de 2W, 5W, 8W e 10W. Verificou-se o desvio padrão do conjunto de medições e aplicando-se a Equação 3.3, calculou-se o desvio da medição associada aos fluxímetros.

$$DM = S.t \quad (3.3)$$

onde:

- DM é o desvio da medição, em $W/m^2 \mu V$;
- S é o desvio padrão do conjunto das oito medições, em $W/m^2 \mu V$;
- t é o coeficiente de Student (para 95% de confiança), usando 7 graus de liberdade.

3.3.3 Medição da resistência térmica dos fluxímetros

No ensaio de medição da condutividade térmica, os dados obtidos são referentes ao conjunto fluxímetros-amostra. Para a determinação da condutividade térmica das amostras, é necessário o conhecimento da resistência térmica dos fluxímetros, pois esta parcela deverá ser descontada do valor da resistência total medida no experimento real.

Para determinar a resistência térmica dos fluxímetros, um experimento semelhante ao da Figura 3.7 é realizado. Quando o regime permanente se estabelece, utiliza-se a Equação 3.4 para determinar a resistência do conjunto de fluxímetros.



Figura 3.7. Determinação da resistência térmica do conjunto de fluxímetros.

A placa de alumínio utilizada tem espessura bastante pequena (ordem de 300 μ m). Desta forma, pode-se desconsiderar a resistência térmica da placa. A resistência dos fluxímetros é calculada pela Equação 3.4.

$$R_f = \frac{\Delta T}{q} \quad (3.4)$$

onde:

- R_f é a resistência térmica dos fluxímetros, em $\text{m}^2\text{K/W}$;
- ΔT é a diferença de temperatura entre os dois fluxímetros, em K;
- q é a densidade de fluxo de calor médio medido pelos dois fluxímetros, em W/m^2 .

3.4 EQUIPAMENTOS SUPLEMENTARES

Para a alimentação da resistência aquecedora utilizou-se uma fonte de tensão-corrente regulável de marca Hewlett-Packard, modelo HP 6114A (Figura 3.8). A tensão é

regulada de modo a se obter uma potência desejada, que será dissipada na resistência aquecedora.



Figura 3.8. Fonte de alimentação da resistência aquecedora.

Para a leitura das temperaturas durante o experimento, utilizou-se um sistema de aquisição de sinais da marca Agilent, modelo 34970A (Figura 3.9). O sistema de aquisição foi conectado a um microcomputador que, num intervalo de tempo pré-determinado, armazena os dados lidos pelo equipamento. Utilizou-se uma interface gráfica desenvolvida pelos pesquisadores do LMPT que transforma os dados lidos pelo sistema de aquisição em dados utilizáveis em planilhas eletrônicas, como por exemplo, o Microsoft Excel[®].



Figura 3.9. Sistema de aquisição de sinais.

3.5 PROCEDIMENTOS ADOTADOS PARA A MEDIÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA

A condutividade térmica do material ensaiado no método fluximétrico é obtida mediante a medição dos seguintes parâmetros: i) fluxo de calor por unidade de área que atravessa a amostra, ii) diferença de temperatura entre as faces da amostra e iii) espessura da amostra. Conhecendo-se os parâmetros citados, a condutividade térmica da amostra é determinada aplicando a Equação 3.5. Com o objetivo de se avaliar a repetibilidade dos valores obtidos com os ensaios, realizaram-se quatro ensaios por amostra, uma por dia para cada amostra.

$$\lambda = \frac{q \cdot e}{\Delta T} \quad (3.5)$$

onde:

- λ é a condutividade térmica, em W/mK;
- q é a densidade de fluxo de calor que atravessa as amostras (média dos valores obtidos pelos dois fluxímetros) , em W/m²;
- e é a espessura da amostra, em metros;
- ΔT é a diferença de temperatura entre as faces quente e fria da amostra, em K.

3.5.1 Montagem do experimento

A montagem do experimento utilizado para as medições de condutividade térmica através do método fluximétrico foi semelhante ao esquema da Figura 3.10. A placa de aço da Figura 3.10 (massa de 3kg) tem a função de garantir uma carga de aprisionamento, minimizando a formação de espaços de ar nas interfaces amostra-fluxímetros.

O isolamento lateral é formado por pedaços de poliestireno expandido e chumaços de algodão. O isolamento utilizado tem espessura em torno de 1cm. A função do isolamento lateral é minimizar as fugas de calor que ocorrem pelas laterais dos fluxímetros e da amostra. A Figura 3.11 mostra a montagem do experimento real para medição de condutividade térmica nas amostras de vidro.

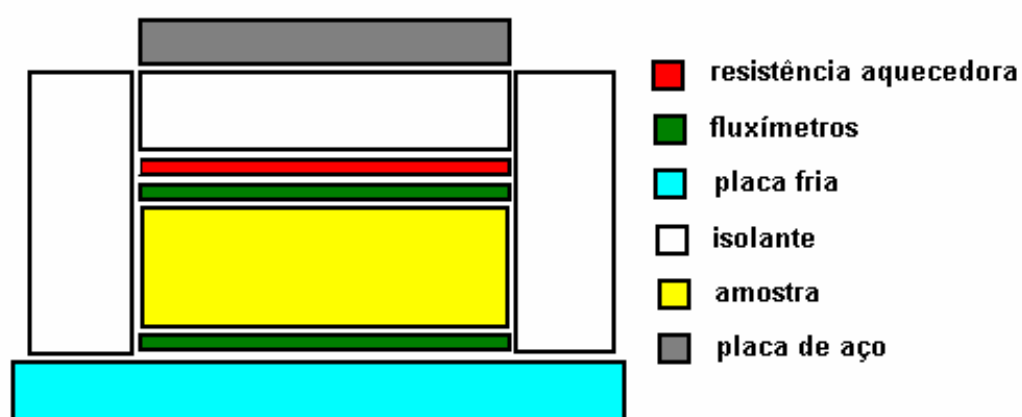


Figura 3.10. Montagem do experimento do método fluximétrico

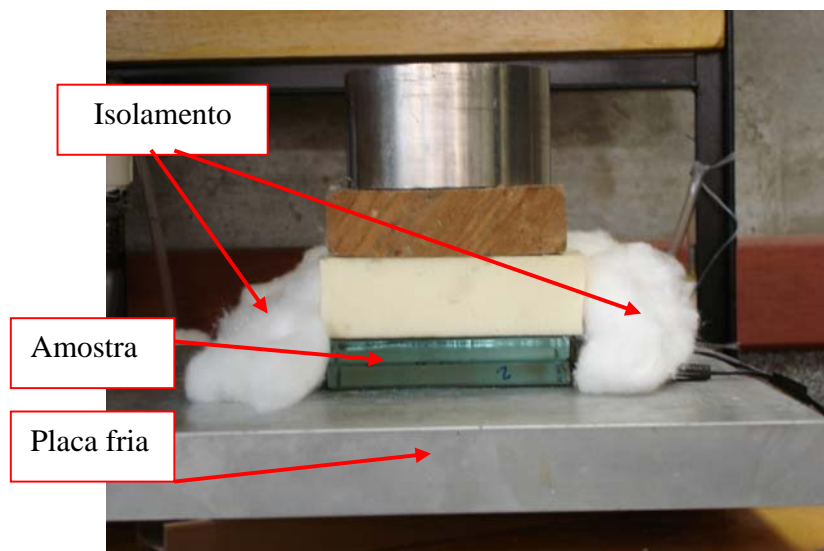


Figura 3. 11. Experimento real do método fluximétrico.

3.5.2 Medição do fluxo de calor

A medição do fluxo de calor é obtida indiretamente pelos fluxímetros. Os sinais provenientes dos fluxímetros são sinais de tensão, e utilizando as constantes de calibração pode-se obter o fluxo de calor que o fluxímetro detectou, através da Equação 3.6. Apenas os sinais da área central dos fluxímetros são utilizados no cálculo da condutividade térmica. Como serão utilizados dois fluxímetros, o fluxo de calor considerado no cálculo da condutividade térmica será uma média aritmética dos dois fluxos.

$$q = c \cdot \Delta V \quad (3.6)$$

onde:

- q é a densidade de fluxo de calor, em W/m^2 ;
- c é a constante de calibração do fluxímetro, em $\text{W/m}^2 \mu\text{V}$;

- ΔV é o sinal do fluxímetro, em μV .

3.5.3 Área de medição

A área de medição considerada nos cálculos da condutividade é a área central do fluxímetro. Para o caso dos fluxímetros utilizados neste trabalho (10 x 10 cm), a área é igual à área central (5x5cm), ou seja, 0,0025 m².

3.5.4 Espessura das amostras

A medição da espessura das amostras foi efetuada com um paquímetro marca Mitutoyo[®], com resolução de 0,05mm. Nas amostras incompressíveis, como o vidro, efetuaram-se medições em pelo menos três pontos em cada uma dos quatro lados. No caso de amostras compressíveis, como o poliestireno expandido, a espessura foi medida depois da montagem do experimento; a quantidade de pontos é a mesma que no caso anterior.

3.5.5 Medição de temperatura

A medição da temperatura é feita por um termopar diferencial (tipo T) instalado no centro do fluxímetro (Figura 3.3). O termopar foi calibrado conforme mostrado no Apêndice A.

3.5.6 Condição de regime permanente

A condição de estabelecimento do regime permanente foi baseada na ISO 8301 (1991). A Norma citada sugere o cálculo de um intervalo entre as medições de fluxo de calor e temperatura, em função das propriedades da amostra (Equação 3.7).

Se em cinco intervalos de medição dos parâmetros citados no tempo calculado pela Equação 3.7, a resistência térmica da amostra não apresentar diferença acima de 1%, o regime permanente é atingido.

$$T = \rho.c.e.R \quad (3.7)$$

onde:

- T é o intervalo de tempo entre as medições, em segundos;
- ρ é densidade da amostra, em kg/m^3 ;
- c é o calor específico, em $\text{J}/(\text{kg.K})$;
- e é a espessura da amostra, em metros;
- R é a resistência térmica estimada da amostra, em $(\text{m}^2\text{K/W})$.

3.5.7 Condições do laboratório

As condições do laboratório foram mantidas por um sistema de climatização artificial já existente. O condicionamento do ar no laboratório é essencial, pois minimiza os erros nas medições. O objetivo é que a temperatura do ar mantenha-se próxima a 25°C , e a umidade relativa, próxima de 50%. Para monitorar a temperatura e a umidade relativa do ar, instalou-se um sensor de temperatura e umidade da marca HOBO, mostrado na Figura 3.12. O equipamento monitorou o laboratório das 9 às 22h em um único dia. Assumiu-se condições semelhantes para os demais dias em que os ensaios foram realizados.



Figura 3. 12. Equipamento utilizado para monitorar a temperatura e a umidade do ar no interior do laboratório.

3.6 MODELAGEM MATEMÁTICA

3.6.1 O problema a ser simulado e o modelo matemático adotado

Primeiramente, desenvolveu-se um modelo analítico simples para verificar a influência dos parâmetros no valor da condutividade térmica. A Equação 3.8 indica o erro percentual entre a condutividade térmica calculada e a assumida inicialmente pelo modelo.

$$E(\%) = \left(\frac{\lambda_a - \lambda}{\lambda_a} \right) 100 \quad (3.8)$$

Onde:

- $E(\%)$ é o erro percentual;
- λ_a é a condutividade térmica da amostra assumida, em W/mK;
- λ é a condutividade térmica calculada através do modelo da Figura 3.13, em W/mK.

O objetivo desta análise é obter uma equação que relacione o erro no valor da condutividade térmica com os parâmetros envolvidos na medição de tal propriedade. A Figura 3.13 mostra o modelo simples para analisar a influência dos parâmetros na condutividade térmica.

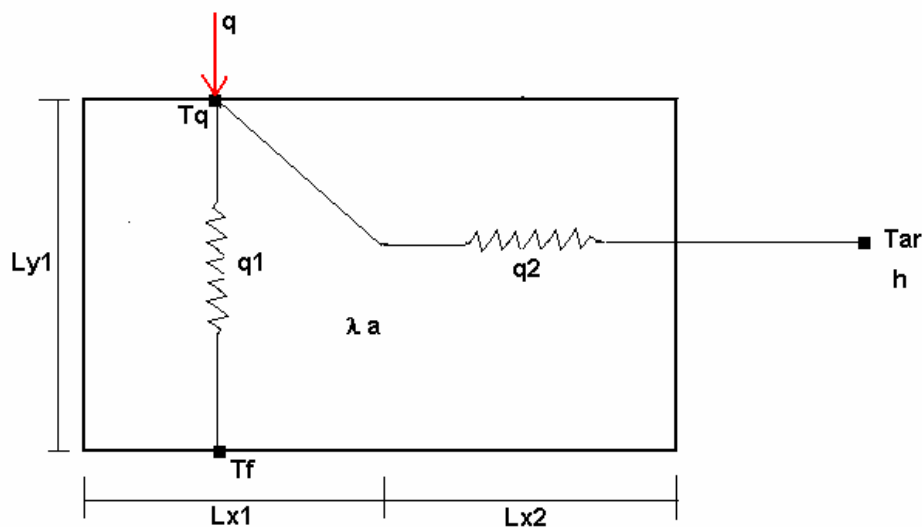


Figura 3. 13. Modelo matemático simples para analisar o erro na medição da condutividade térmica.

onde:

- q é a densidade de fluxo de calor lida que é injetada na face quente da amostra, em W/m^2 ;
- T_q é temperatura da face quente da amostra, em $^{\circ}\text{C}$;
- T_f é a temperatura da face fria da amostra, em $^{\circ}\text{C}$;
- T_{ar} é a temperatura do ar, em $^{\circ}\text{C}$;
- h é o coeficiente de convecção natural, em $\text{W/m}^2\text{K}$;
- λ é a condutividade térmica da amostra, em W/mK ;
- q_1 é a densidade de fluxo de calor que atravessa a amostra, em W/m^2 ;
- q_2 é a densidade de fluxo de calor que não atravessa a amostra (fuga de calor), em W/m^2 ;
- L_{y1} é a espessura da amostra, em m;
- L_{x1} é a dimensão relativa à área de medição, em m;
- L_{x2} é a dimensão do anel de proteção lateral (área de leitura lateral), em m.

- q_{y1} , q_{y2} , q_{y3} , q_{y4} , q_{y5} e q_{y6} são as densidades de fluxo de calor na direção vertical, em W/m^2 ;
- q_{x1} , q_{x2} , q_{x3} , q_{x4} , q_{x5} e q_{x6} são as densidades de fluxo de calor na direção horizontal, em W/m^2 ;
- T_{infinito} e T_{fria} são as temperaturas do ar ambiente e da superfície fria, respectivamente, em K;
- λ_a , λ_f e λ_g são as condutividades térmicas da amostra, do fluxímetro e do gap, respectivamente, em W/mK .

3.6.2 Comparação dos resultados do modelo matemático com os dados experimentais

A primeira dúvida que surgiu em relação ao modelo foi quanto à adoção do valor do coeficiente de troca de calor por convecção. Incropera e De Witt (1998) apresentam algumas correlações para estimativa de tal coeficiente, e também citam que para convecção natural (caso assumido para o modelo), o coeficiente de troca de calor por convecção apresenta valores entre 2 e 25 W/m^2K . Para o experimento que se pretende modelar, a estimativa do coeficiente de convecção, segundo as correlações apresentadas em Incropera e De Witt (1998), apresentou um valor de 3,44 W/m^2K , no entanto decidiu-se por assumir o valor de 5,00 W/m^2K .

Como forma de comparação dos valores obtidos com o modelo matemático desenvolvido e os experimentais, simulou-se o caso de uma medição de condutividade térmica em duas amostras de poliestireno expandido: 10 e 20mm de espessura. Os valores obtidos com a simulação foram comparados com os obtidos na medição experimental. Compararam-se os dados relativos à percentagem da diferença de fluxos de calor lidos pelos fluxímetros superior e inferior, por ser este o principal problema encontrado nos ensaios experimentais. Convém ressaltar que para os casos simulados, o isolamento lateral foi desconsiderado por não haver uma fonte confiável de valores de condutividade térmica para o algodão, material utilizado como isolamento lateral. Os dados de entrada para as simulações são mostrados na Figura 3.15 (interface do programa EES), somente modificou-se o valor da espessura da amostra (Ly_2) para simular as duas situações: 10 e 20mm. Na Figura 3.15 estão mostrados os dados para a simulação de uma amostra de poliestireno

expandido de 20mm. Para o cálculo da diferença de fluxos de calor entre o fluxímetro inferior e superior utilizaram-se os fluxos q_{y4} e q da Figura 3.15. O valor adotado para a condutividade térmica do fluxímetro ($\lambda=150,00\text{W/mK}$) será melhor descrita adiante no item 3.6.4.

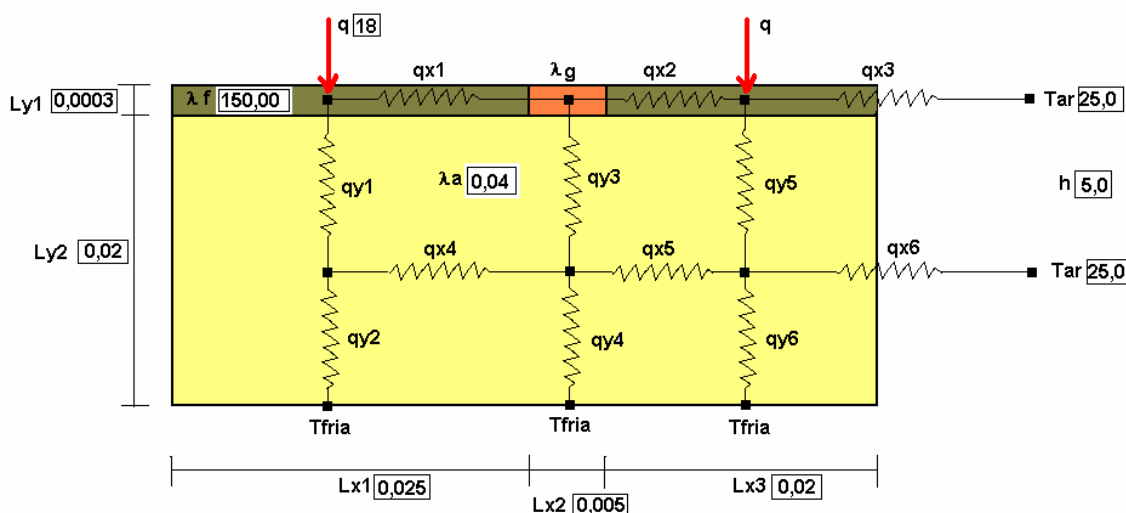


Figura 3. 15. Dados de entrada para o modelo matemático.

3.6.3 Casos simulados no modelo matemático

De posse do modelo matemático validado, simulou-se a influência dos parâmetros intervenientes ao experimento no valor da condutividade térmica medida. Os parâmetros simulados foram: i) material e espessura da amostra, ii) espessura do isolamento lateral, iii) coeficiente de troca de calor por convecção, iv) material empregado na construção do fluxímetro, v) temperatura da placa fria e vi) influência da largura do anel de proteção lateral.

Nas simulações para verificar a influência do material e espessura da amostra, simularam-se espessuras de 10, 20, 30, 40 e 50mm para condutividades térmicas entre 0,04, 0,10, 0,50 e 1,00W/mK. Os casos simulados não possuem isolamento lateral e o coeficiente de troca de calor por convecção assumido foi de 5W/m²K.

A influência do isolamento lateral foi analisada, simulando-se no modelo matemático amostras de poliestireno expandido e vidro com condutividades térmicas de 0,04 e 0,80W/mK, respectivamente, nas espessuras de 10 e 20mm. O isolamento lateral assumido foi de poliestireno expandido ($\lambda=0,04\text{W/mK}$) nas espessuras de 10 a 50mm. Para tal, o modelo teve de ser modificado. A modificação consistiu na inclusão da resistência térmica relativa a espessura do isolamento lateral.

Para verificar a influência do coeficiente de troca de calor por convecção, simulou-se no modelo matemático os casos de coeficientes de convecção iguais a 1, 2, 5, 10, 15 e 20W/m²K em amostra de vidro e poliestireno expandido de 10 e 20mm de espessura.

Nas simulações para verificar a influência do material empregado na construção do fluxímetro, simulou-se no modelo matemático, várias condutividades térmicas equivalentes para o fluxímetro (valores de 0,1 até 150W/mK). Simularam-se somente amostras de 20mm (vidro e poliestireno expandido).

Em relação à influência da temperatura da placa fria, simulou-se no modelo matemático, temperaturas variando de 22 a 25°C. Simularam-se amostras de 10 e 20mm de poliestireno expandido e vidro sem isolamento lateral.

A análise da influência do anel de proteção lateral foi realizada mediante a simulação de amostras com condutividades térmicas de 0,04 e 0,80W/mK. As espessuras adotadas foram de 20mm. Variou-se a dimensão do anel de guarda nos valores de 5 a 30mm.

3.6.4 Hipóteses adotadas no modelo

A primeira hipótese simplificativa adotada diz respeito ao fluxímetro. Como visto na Figura 2.15, o fluxímetro é composto de materiais como cobre, kapton e constantan. Para simplificar a análise, adotou-se uma condutividade térmica equivalente, baseada na construção mostrada na Figura 3.16. O circuito térmico equivalente é representado pela Figura 3.17. A condutividade térmica equivalente é obtida, substituindo-se o termo referente à resistência térmica, calculado pela Equação 3.9, na Equação 3.10. A condutividade térmica equivalente para o fluxímetro é de 150,00W/mK. Convém ressaltar que este valor é

assumido somente para o sentido horizontal; no sentido vertical a resistência térmica do fluxímetro é desconsiderada.

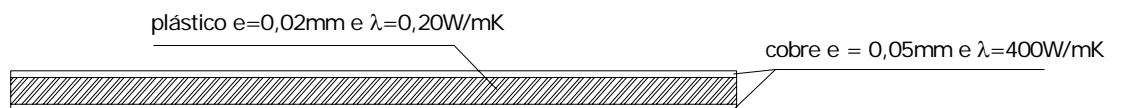


Figura 3. 16. Esquema de composição do fluxímetro para simulação.

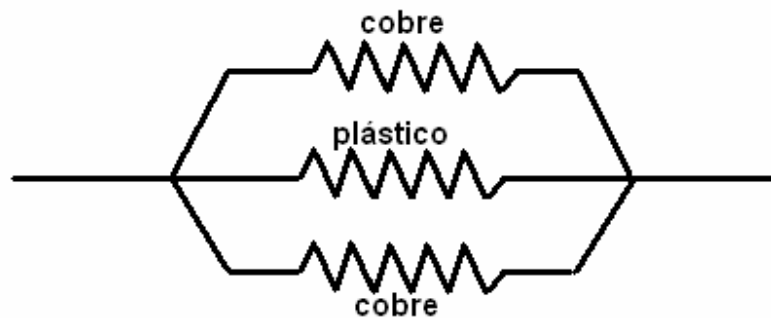


Figura 3. 17. Esquema do circuito elétrico análogo ao circuito térmico.

$$R_{eq} = \frac{A_{total}}{2 \frac{A_{cobre}}{R_{cobre}} + \frac{A_{plástico}}{R_{plástico}}} \quad (3.9)$$

onde:

- R_{eq} é a resistência térmica equivalente do conjunto, em m^2K/W ;
- A_{total} é a área total perpendicular ao fluxo de calor, em m^2 ;
- A_{cobre} é a área da seção de cobre perpendicular ao fluxo de calor, em m^2 ;
- $A_{plástico}$ é a área da seção de plástico perpendicular ao fluxo de calor, em m^2 ;
- R_{cobre} é a resistência térmica do cobre, em m^2K/W ;
- $R_{plástico}$ é a resistência térmica do plástico, em m^2K/W ;

$$\lambda_{eq} = \frac{e}{R_{eq}} \quad (3.10)$$

onde:

- λ_{eq} é a condutividade térmica equivalente, em W/mK ;
- e, neste caso, é assumido como 1,00 para representar um metro linear.

3.7 MEDIÇÕES PÓS-SIMULAÇÃO

Depois de efetuadas as simulações com o modelo matemático, efetuaram-se novas medições, para se avaliar os resultados obtidos com a simulação. As novas medições foram efetuadas utilizando-se fluxímetros modificados. As medições efetuadas nesta etapa seguem as mesmas características das medições anteriores, a única diferença é o fluxímetro utilizado. Nesta etapa, utilizaram-se apenas amostras de poliestireno expandido por estas apresentarem os maiores desvios nos fluxos de calor (superior e inferior).

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

4.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo é dividido em quatro partes: i) análise de termografia, ii) medições com o método fluximétrico, iii) modelagem matemática do experimento que utiliza o método fluximétrico e iv) medições pós-simulação.

A primeira parte trata da análise da distribuição de temperaturas na resistência aquecedora. Para tal, efetuou-se uma análise através da técnica da termografia.

A segunda parte mostra os resultados de todas as medições efetuadas com os fluxímetros. Primeiramente, é mostrado o ensaio para calibração dos fluxímetros, posteriormente são mostrados os resultados das medições de condutividade térmica nas amostras de vidro e poliestireno expandido. Estes ensaios experimentais têm o objetivo maior de mostrar os problemas encontrados na medição de condutividade térmica, evidenciando os desvios dos fluxos superior e inferior medidos pelos fluxímetros.

Na terceira parte são mostrados os resultados dos casos simulados no modelo matemático desenvolvido, evidenciando as influências dos diversos parâmetros envolvidos no experimento no valor da condutividade térmica calculada.

Na quarta parte é apresentado o fluxímetro modificado, bem como os resultados referentes às medições com ele efetuadas.

4.2 ANÁLISE DE TERMOGRAFIA

O equipamento de termografia registrou o aquecimento da resistência aquecedora até que se atingisse o regime permanente. A Figura 4.1(a) mostra o início do processo de aquecimento e a Figura 4.1(b) o processo já em regime permanente. Observam-se temperaturas maiores no centro da placa e temperaturas menores nas laterais. A Figura 4.2 mostra o mesmo momento registrado na Figura 4.1(b) com uma escala de temperaturas variando de 55 a 58°C, onde pode-se verificar com maior detalhe a distribuição das temperaturas. As maiores temperaturas estão próximas ao centro, onde ocorre também uma melhor distribuição destas temperaturas. O Projeto de Norma 02:135.07-005, recomenda

que a medição dos fluxos de calor sejam efetuados numa área central dos fluxímetros, justamente para minimizar os problemas decorrentes da má distribuição de temperaturas nas áreas periféricas da placa aquecedora.

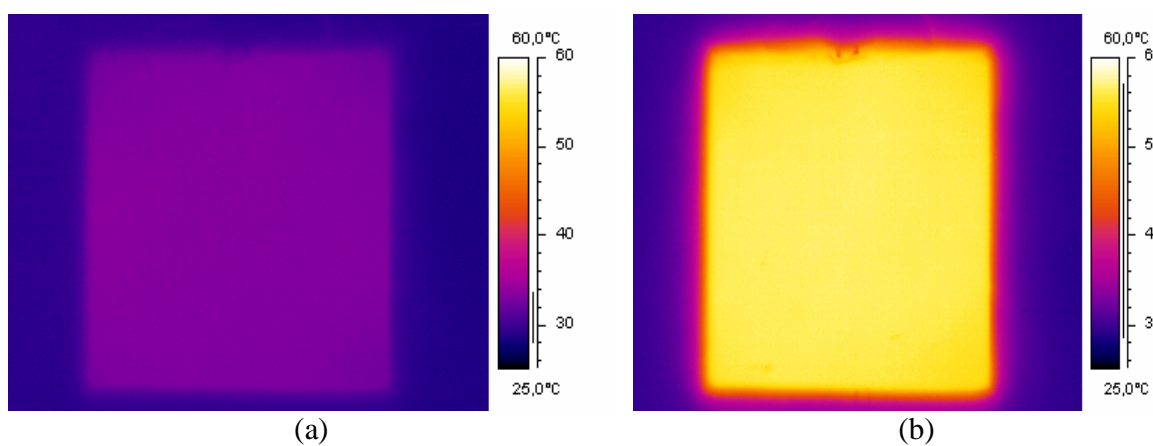


Figura 4. 1. Fases da termografia na resistência aquecedora do método fluximétrico.

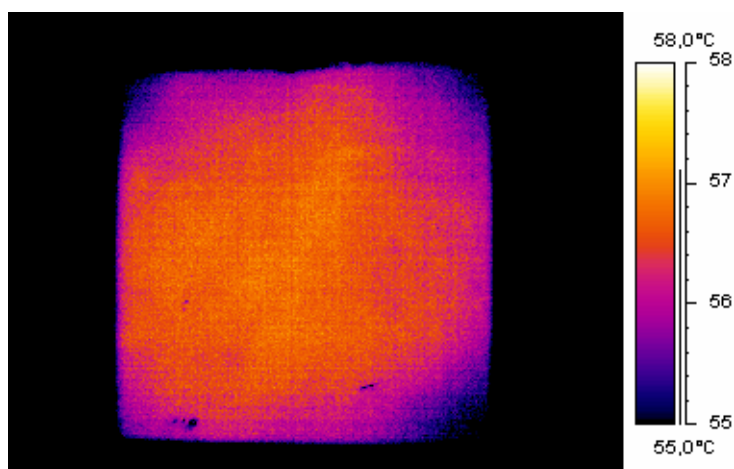


Figura 4. 2. Distribuição de temperaturas na resistência aquecedora do método fluximétrico.

4.3 MEDIÇÕES COM O MÉTODO FLUXIMÉTRICO

4.3.1 Constantes de calibração, incerteza de medição e resistência térmica referente aos fluxímetros

Conforme descrito no item 3.3.2, procedeu-se a calibração dos fluxímetros a gradiente tangencial que serão utilizados nas medições de condutividade térmica. As constantes de calibração são mostradas na Tabela 4.1. Os valores apresentados na Tabela 4.1 são valores médios das constantes obtidas com as potências de 8 e 10W.

Na análise da incerteza dos fluxímetros, utilizou-se somente o fluxímetro A. Conforme o item 3.3.2, as oito medições apresentaram um desvio padrão de 0,001374 W/(m²μV), o coeficiente t de Student para sete graus de liberdade é 2,365. O desvio da medição para o fluxímetro é de 0,00325 W/(m²μV). Em termos percentuais a incerteza de medição para o fluxímetro A é de 3,53%. A mesma incerteza foi adotada para o fluxímetro B.

Tabela 4. 1. Constantes de calibração dos fluxímetros.

Fluxímetro	Constante de calibração ($\frac{W}{m^2 \mu V}$)
Auxiliar	0,0319
A _{central}	0,0922
B _{central}	0,0980
A _{periférica}	0,0375
B _{periférica}	0,0469

A resistência térmica dos fluxímetros, determinada de acordo com o item 3.3.3, apresentou um valor de 0,005m²K/W. Convém ressaltar que esta resistência deve ser subtraída do valor da resistência total do conjunto (amostra e fluxímetros) para se obter a condutividade térmica.

4.3.2 Medições de condutividade térmica

4.3.2.1 Condições do laboratório onde foram realizados os ensaios

Monitoraram-se as condições do laboratório onde se efetuaram as medições apresentadas neste trabalho. O sensor empregado possui precisão de 0,5°C. Instalou-se o sensor próximo ao local onde se efetuaram as medições de condutividade térmica. A Figura 4.3 mostra o comportamento da temperatura do ar ao longo de 13 horas, e na Figura 4.4 é mostrado o comportamento da umidade relativa do ar do laboratório ao longo do mesmo intervalo de tempo. Percebe-se que a variação é pequena tanto na temperatura quanto na umidade do ar. A temperatura variou de 24,0 a 24,8°C, mantendo-se próxima a 24,4°C em grande parte do período. Já a umidade relativa apresentou extremos de 62 e 54%. As condições, principalmente de temperaturas, podem ser assumidas como constantes ao longo do período de ensaio.

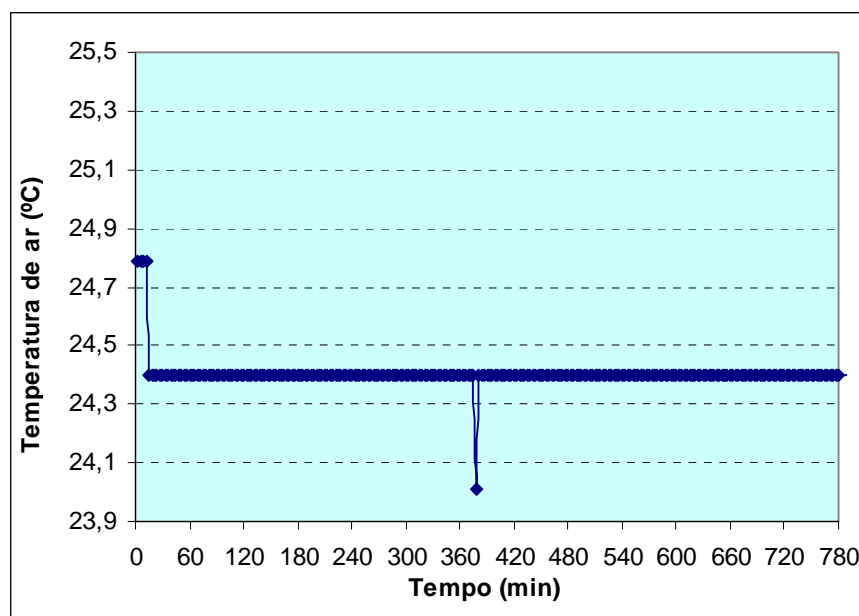


Figura 4. 3. Comportamento da temperatura do ar do laboratório onde foram realizadas as medições.

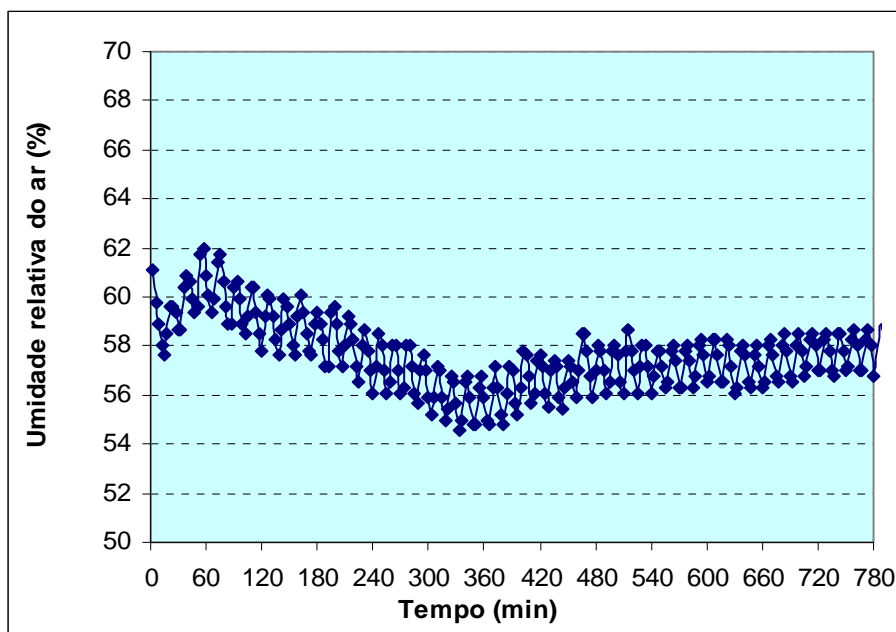


Figura 4. 4. Comportamento da umidade relativa do ar do laboratório onde foram realizadas as medições.

4.3.2.2 Medições nas amostras de vidro

Efetuaram-se quatro ensaios em cada amostra de vidro (espessuras de 10 e 20mm). A condutividade térmica da amostra foi calculada quando era atingido o regime permanente. O regime permanente é considerado atingido quando os requisitos apresentados no item 3.5.6 forem satisfeitos. Para as amostras de vidro de 10 e 20 mm o intervalo entre as medições, calculado pela Equação 3.7, foi de 4 e 14 minutos, respectivamente. Quando cinco medições neste intervalo de tempo fossem efetuadas e os valores da resistência térmica da amostra não apresentassem variações maiores que 1,0%, a condição de regime permanente era considerada satisfeita.

Na Figura 4.5 são mostrados os valores das densidades de fluxo de calor medidos pelos fluxímetros inferior e superior em uma das medições efetuadas em uma amostra de vidro de 10mm de espessura. Resultados semelhantes foram obtidos para os outros três ensaios. Para o caso da Figura 4.5, a diferença entre a densidade de fluxo de calor é de 6,0%. O regime permanente neste ensaio ocorreu em 45 minutos.

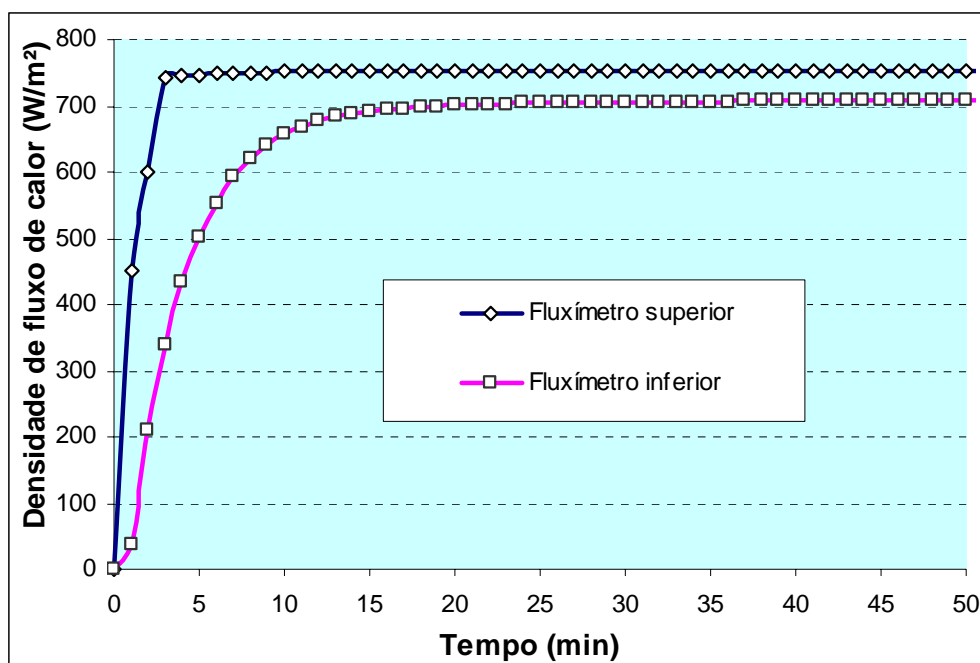


Figura 4. 5. Densidade de fluxo de calor medidos durante ensaio com amostra de vidro de 10mm de espessura.

A Figura 4.6 mostra a evolução da diferença da densidade de fluxos de calor para a mesma amostra citada anteriormente e para uma amostra de 20mm de espessura. Percebe-se que no início do ensaio a diferença é grande, diminuindo com o passar do tempo. Isto se deve ao fato de que no início do ensaio a diferença de temperatura (Figura 4.7) entre as faces quente e fria da amostra é pequena (próxima de zero), aumentando na medida em que o calor vai sendo dissipado na resistência aquecedora. A diferença nos fluxos para a amostra de 10mm de espessura é em torno de 6,0% e para a amostra de 20mm é ligeiramente maior, em torno de 7,5%.

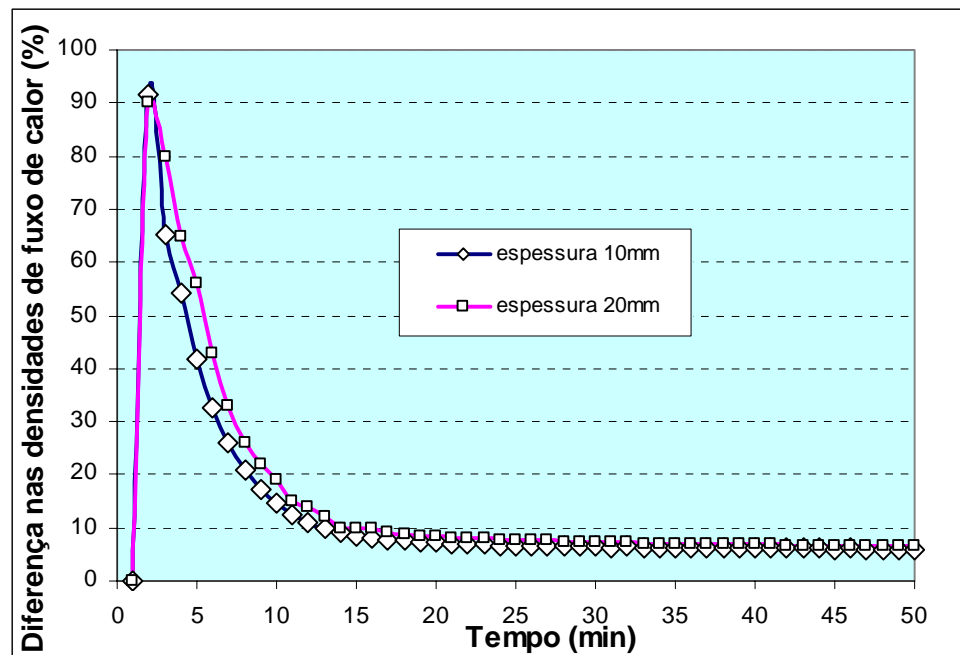


Figura 4. 6. Comportamento da diferença da densidade de fluxo de calor medidos pelos fluxímetros superior e inferior.

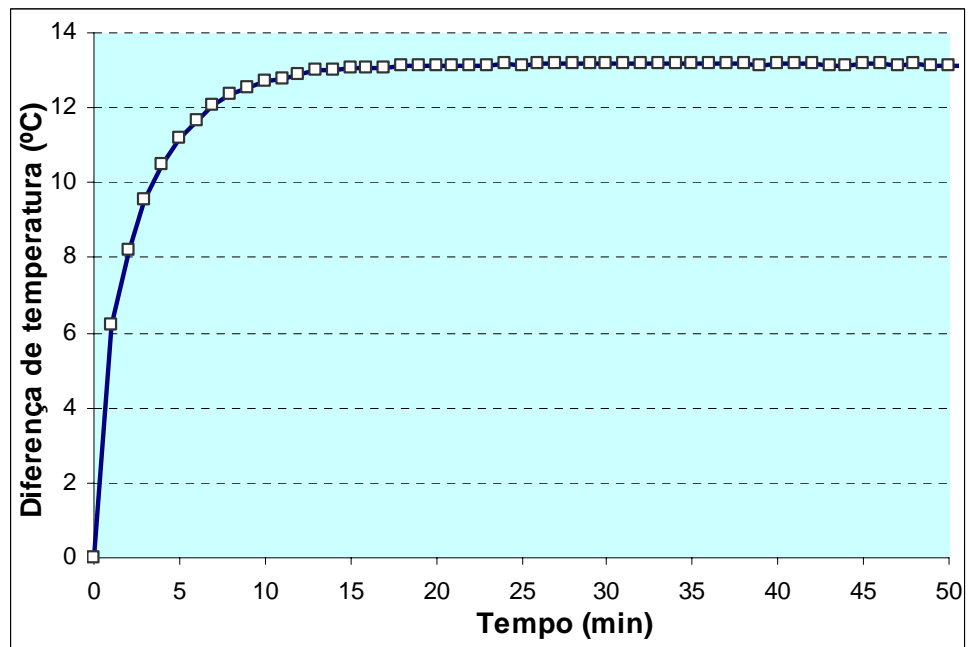


Figura 4. 7. Comportamento da diferença de temperatura entre as faces quente e fria de uma amostra de vidro de 10mm ensaiada no método fluximétrico.

Os valores de condutividade térmica para duas amostras de vidro (10 e 20mm) são mostrados na Tabela 4.2 para os quatro ensaios. Percebe-se que existe uma diferença no valor final da condutividade térmica em função da espessura da amostra ensaiada. A diferença entre os valores é, em média, de 8,3%. Sendo que valores maiores de condutividade térmica foram obtidos quando se ensaiou as amostras de 20mm. Convém ressaltar que nos valores de condutividades térmicas apresentadas já estão subtraídas as resistências térmicas referentes aos fluxímetros.

Tabela 4. 2. Valores de densidade de fluxo de calor, diferença de temperatura e condutividade térmica para amostras de vidro de 10 e 20mm de espessura.

Ensaio	Densidade de fluxo de calor (W/m^2)		Diferença de temperatura (K)		Condutividade térmica (W/mK)		Diferença no valor de λ (%)
	10mm	20mm	10mm	20mm	10mm	20mm	
1	731,65	631,31	13,0	17,9	0,783	0,856	8,5
2	719,20	617,08	12,8	17,5	0,781	0,856	8,7
3	743,58	634,90	13,2	18,0	0,784	0,856	8,4
4	737,68	601,83	13,1	17,2	0,784	0,848	7,5
média					0,783	0,854	8,3

4.3.2.3 Medições nas amostras de poliestireno expandido

Efetuar-se quatro ensaios em cada amostra de poliestireno expandido (10 e 20mm de espessura). Os valores da condutividade térmica foram calculados após o estabelecimento do regime permanente. Procedeu-se o cálculo dos intervalos entre as medições como mostrado na Equação 3.7. Os intervalos calculados foram de 3 e 11 minutos para as amostras de 10 e 20mm, respectivamente.

A Figura 4.8 mostra a evolução da diferença das densidades de fluxo de calor ao longo do intervalo de tempo em que o ensaio foi realizado. Da mesma forma que para as amostras de vidro, a diferença entre os fluxos é grande e vai diminuindo com o passar do

tempo. Para a amostra de 10mm de espessura a diferença é em torno de 7,5%. Já para a amostra de 20mm a diferença é maior, em torno de 20,0%.

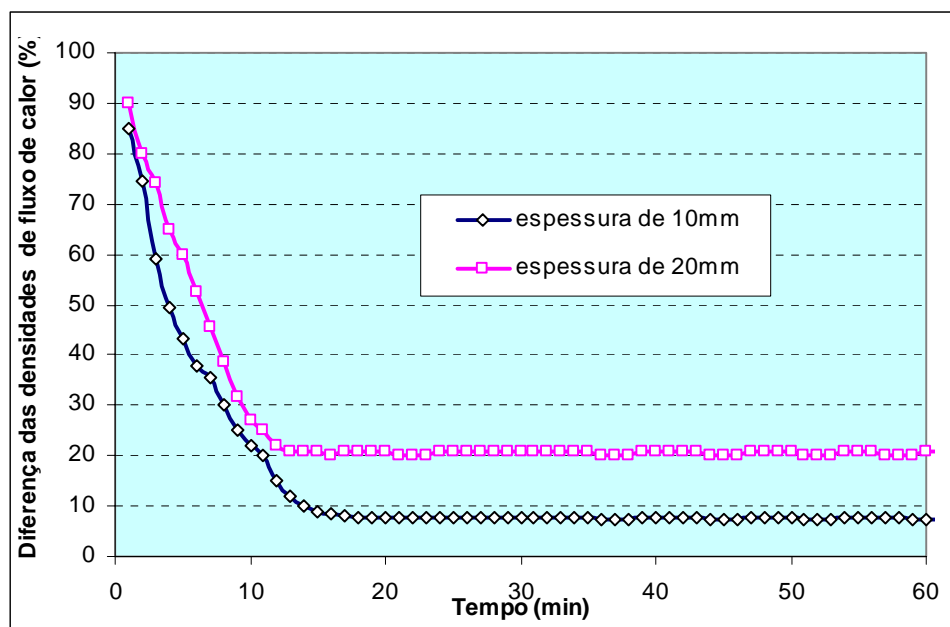


Figura 4. 8. Comportamento da diferença de fluxos de calor entre os fluxímetros superior e inferior no ensaio de uma amostra de poliestireno expandido de 10 e 20mm de espessura.

Os valores de condutividade térmica para as duas amostras de poliestireno expandido (10 e 20mm de espessura) são mostrados na Tabela 4.3. Percebe-se que os desvios nos valores da condutividade térmica atingem, em média, o valor de 18,2%, duas vezes mais do que para as amostras de vidro. A exemplo das amostras de vidro, os valores maiores de condutividade térmica foram obtidos ensaiando-se as amostras de 20mm de espessura.

Tabela 4. 3. Valores de densidade de fluxo de calor, diferença de temperatura e condutividade térmica para amostras de poliestireno expandido de 10 e 20mm de espessura.

Ensaio	Densidade de fluxo de calor (W/m^2)		Diferença de temperatura (K)		Condutividade térmica (W/mK)		Diferença no valor de λ (%)
	10mm	20mm	10mm	20mm	10mm	20mm	
1	18,00	16,05	4,1	6,1	0,044	0,053	16,9
2	19,28	15,70	4,5	5,8	0,043	0,054	20,3
3	18,55	15,83	4,3	5,9	0,044	0,054	18,5
4	18,40	16,30	4,2	6,2	0,044	0,053	16,9
média					0,043	0,053	18,2

4.3.3 Problemas encontrados no método fluximétrico

O principal problema encontrado no método fluximétrico foi a diferença entre as densidades de fluxo de calor medidos pelos fluxímetros superior e inferior. Em ensaios com amostras de 20mm de poliestireno expandido a diferença chegou a 20,0%. Quando se ensaiam amostras de vidro com a mesma espessura, a diferença é menor, da ordem de 7,5%.

Como existe uma diferença considerável nas densidades de fluxo lidas, principalmente nas amostras de 20mm de poliestireno expandido, suspeita-se que estejam ocorrendo fugas, porém se desconhece por onde e de que forma elas ocorrem.

Inicialmente, suspeitou-se de que as fugas estariam ocorrendo pelo próprio corpo do fluxímetro pelo fato deste ser formado por um material altamente condutor (cobre). Existia também a suspeita de que poderiam estar ocorrendo fugas pelas laterais da amostra, mas já de início um isolamento lateral (algodão) foi disposto durante os ensaios para contornar este problema.

Para analisar estes erros, desenvolveu-se um modelo matemático que representa o experimento. Tal modelo foi utilizado para se efetuar uma análise dos diferentes parâmetros no valor da condutividade térmica medida.

4.4 MODELAGEM MATEMÁTICA DO EXPERIMENTO

4.4.1 Análise da equação obtida pelo modelo analítico simples e dados obtidos pelo modelo matemático

De acordo com o item 3.6.1 e a Equação 3.8, realizou-se a análise da influência dos parâmetros no erro da condutividade térmica. Na análise, assumiu-se $T_{ar}=T_f$ (temperatura do ar igual à temperatura da placa fria). Equacionado-se todos os parâmetros em relação ao nó T_q da Figura 3.13, chegou-se a Equação 4.1. A Equação 4.1 revela que o erro na condutividade térmica é proporcional ao coeficiente de troca de calor por convecção e ao quadrado da espessura da amostra. Parâmetros como a área de medição e proteção lateral são inversamente proporcionais ao erro. A dedução da Equação 4.1 é mostrada no Apêndice C.

$$E(\%) = 50 \cdot \left[\frac{Ly1^2}{Lx1(Lx2 + \frac{\lambda a}{h})} \right] \quad (4.1)$$

onde:

- $Ly1$ é a espessura da amostra, em m;
- $Lx1$ é a dimensão da área de medição, em m;
- $Lx2$ é a dimensão do anela de proteção lateral, em m;
- λ é a condutividade térmica da amostra, em W/mK;
- h é o coeficiente de troca de calor por convecção, em W/m²K.

A Equação 4.1 é útil para se verificar as tendências no erro da condutividade térmica, porém, ela maximiza as fugas por considerar um gradiente, no sentido horizontal, maior do que realmente ocorre. O gradiente considerado é T_q-T_{ar} sendo que o gradiente mais realista é T_m-T_{ar} , onde T_m é a temperatura média da amostra. No entanto, o gradiente T_m-T_{ar} não foi considerado por dificultar as simplificações, gerando uma equação onde não seria possível visualizar, diretamente, a influência dos parâmetros envolvidos. Para analisar

o experimento mais detalhadamente, utilizou-se um modelo matemático mais elaborado (Figura 3.14).

Como demonstrado no item 3.6.3, procedeu-se a comparação dos dados do modelo matemático desenvolvido, simulando-se dois experimentos envolvendo amostras de poliestireno expandido de 10 e 20mm de espessura. Na Figura 4.9 são mostrados os fluxos de calor lidos pelos fluxímetros superior e inferior num ensaio com amostra de poliestireno expandido de 20mm. Quando o regime permanente se estabelece, o fluxo de calor no fluxímetro superior é de $18,00\text{W/m}^2$ e no fluxímetro inferior o fluxo é de $14,42\text{W/m}^2$. Percebe-se um desvio em torno de 20,0%. Simulando-se o experimento no modelo matemático, os valores dos fluxos de calor superior e inferior obtidos foram de: 18,00 e $14,89\text{W/m}^2$ (valores circulados na Figura 4.10).

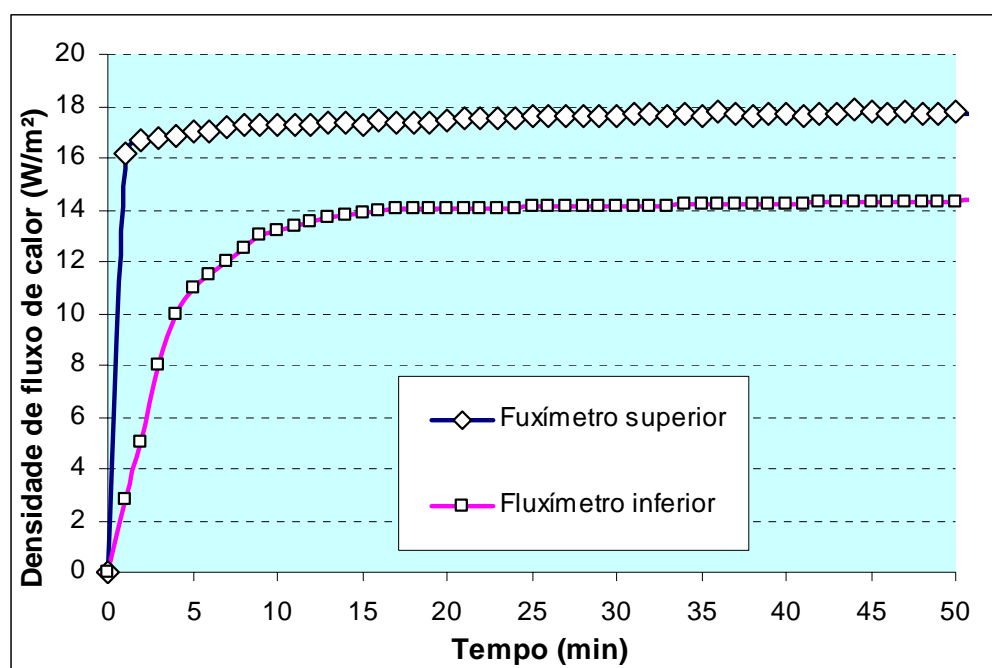


Figura 4. 9. Densidades de fluxo de calor medidas pelos fluxímetros em ensaio com amostra de poliestireno expandido de 20mm de espessura.

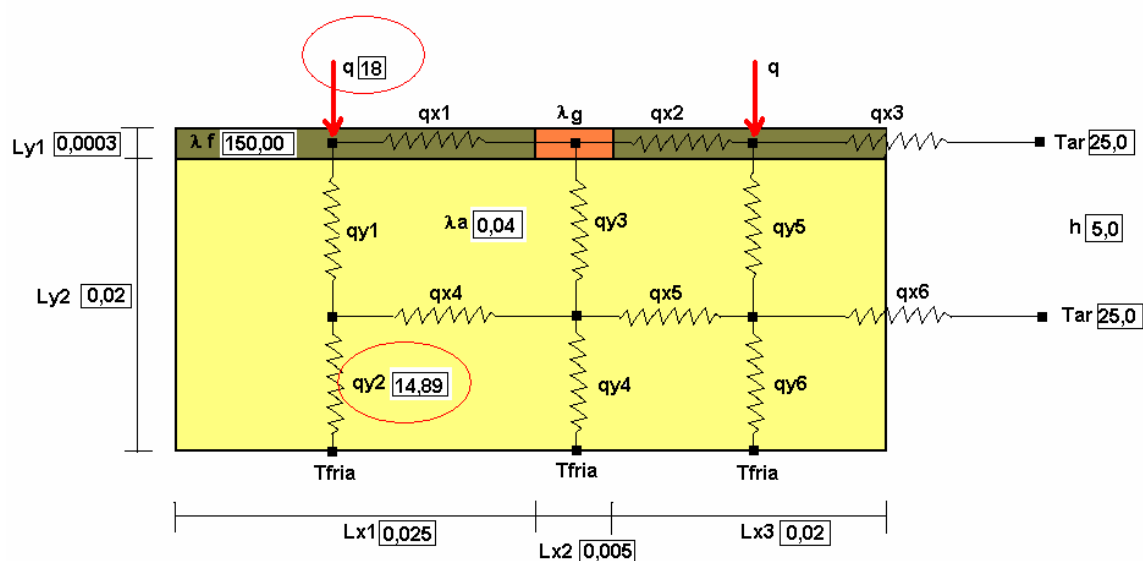


Figura 4. 10. Valores de fluxo de calor obtidos pelo modelo matemático.

Os dados das medições experimentais e os obtidos pelo modelo matemático são mostrados na Tabela 4.4. Percebe-se que o modelo matemático apresentou valores de desvio de fluxo menores que os obtidos no experimento real. Os desvios apresentados foram considerados satisfatórios, pois um modelo matemático dificilmente pode representar totalmente o experimento real.

Tabela 4. 4. Teste do modelo matemático.

	Experimento real			Simulação		
	q_{superior} (W/m ²)	q_{inferior} (W/m ²)	Desvio (%)	q_{superior} (W/m ²)	q_{inferior} (W/m ²)	Desvio (%)
Amostra de 20mm	17,89	14,30	20,0	18,00	14,89	17,2

Para proceder as análises através do modelo matemático desenvolvido, fez-se outro teste de validação. O teste consistiu em simular um experimento sem fugas de calor, onde se assumiu um coeficiente de troca de calor por convecção igual a zero. Desta forma, a condutividade térmica calculada através dos fluxos de calor e gradiente de temperatura

fornecidos pelo modelo matemático, deve representar o valor assumido inicialmente. Efetuou-se a simulação de um ensaio com amostra de poliestireno expandido de 20mm de espessura. O valor de condutividade térmica calculada pelos dados de saída do modelo apresentou um desvio desprezível de 0,01%. Com esta validação foi possível simular os diversos casos que serão apresentados adiante, que evidenciam a influência de parâmetros do experimento no valor final da condutividade térmica medida.

4.4.2 Influência do material e espessura da amostra no valor da condutividade térmica

Nas medições experimentais, constatou-se que os maiores desvios nos fluxos de calor lidos pelos fluxímetros aconteceram quando se ensaiavam amostras de espessura maior que 10mm e de condutividade térmica baixa. Simularam-se espessuras de 10, 20, 30, 40 e 50mm para condutividades térmicas entre 0,04, 0,10, 0,50 e 1,00W/mK. Os casos simulados não possuem isolamento lateral e o coeficiente de troca de calor por convecção assumido foi de 5W/m²K. Na Figura 4.11 é mostrada a influência do material e espessura da amostra no valor da condutividade térmica medida.

Pode-se ver pela Figura 4.11 que quanto maior a espessura do material ensaiado, maiores serão os erros na condutividade térmica medida pelo método fluximétrico. O material da amostra ensaiada também tem influência no valor medido, de modo que para baixos valores de condutividade térmica ($\lambda < 2,00\text{W/mK}$), onde a resistência de contato pode ser desprezada, pode-se afirmar que quanto menor for a condutividade térmica da amostra, maior será o erro na medição. Para o poliestireno expandido, no caso de uma amostra de 50mm de espessura, os erros podem chegar a 13,0%. Já para o caso de um material com condutividade térmica em torno de 1,00W/mK, os erros são menores, não ultrapassando 1,0% mesmo nos casos de espessuras de 50mm.

Percebe-se uma forte influência do material ensaiado no valor da condutividade térmica. Isso pode ser explicado pela resistência térmica oferecida por materiais com menor condutividade térmica: nestes casos os desvios nos fluxos de calor também são maiores. O calor dissipado na face superior da amostra é perdido por convecção pelas laterais da própria amostra para o ar que está em contato com esta. Outro fator que pode estar

contribuindo para estas perdas é a própria estrutura do fluxímetro, que apresenta alta condutividade térmica, em torno de 150,00 W/mK.

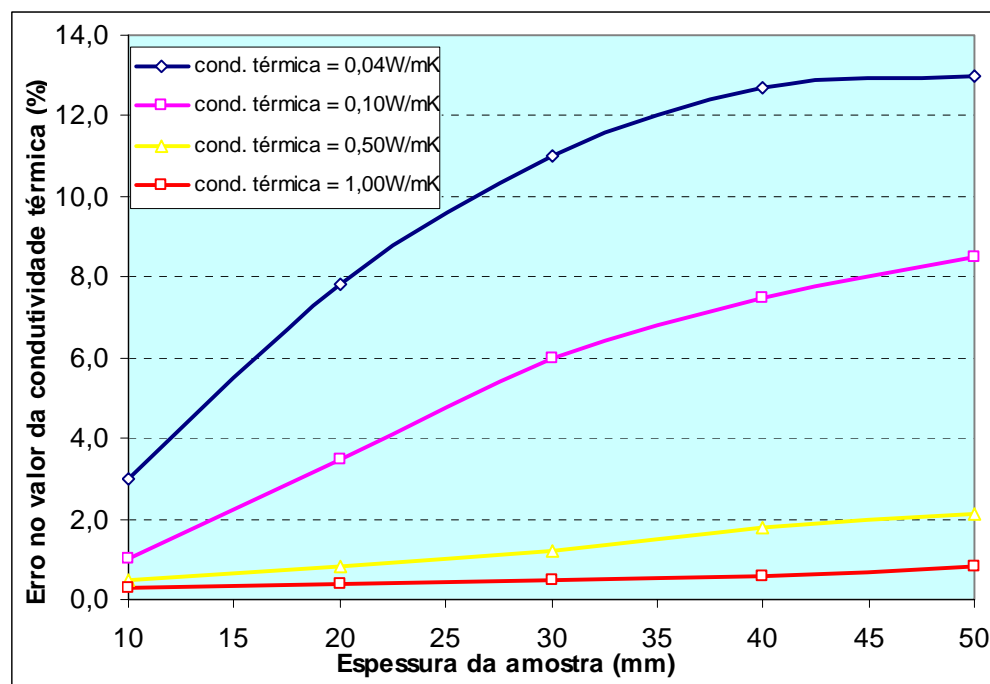


Figura 4. 11. Influência do material e da espessura da amostra no valor da condutividade térmica.

4.4.3 Influência da utilização do isolamento lateral no valor da condutividade térmica

Para se verificar a influência do isolamento lateral nos valores da condutividade térmica, simularam-se amostras de poliestireno expandido e vidro com condutividades térmicas de 0,04 e 0,80W/mK, respectivamente, nas espessuras de 10 e 20mm. O isolamento lateral assumido foi de poliestireno expandido ($\lambda=0,04\text{W/mK}$) nas espessuras de 10 a 50mm. A Figura 4.12 mostra a influência do uso de isolamento lateral no valor da condutividade térmica medida.

Percebe-se pela Figura 4.12 que, de maneira geral, os erros na condutividade térmica diminuem à medida que se aumenta o isolamento lateral. Os menores erros são para a amostra de vidro, chegando bem próximas a zero quando se utiliza isolamento de 50mm.

Já para as amostras de poliestireno expandido, os erros podem ser reduzidos a 1,5% quando se utiliza 50mm de isolamento lateral.

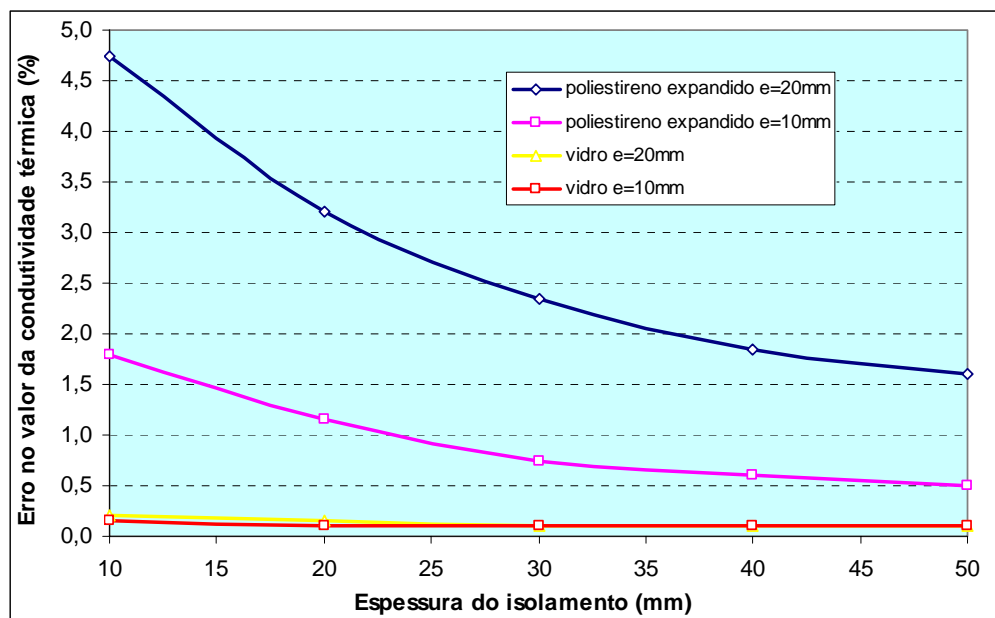


Figura 4. 12. Influência da utilização de isolamento lateral no valor da condutividade térmica.

4.4.4 Influência do coeficiente de troca de calor por convecção no valor da condutividade térmica

Investigou-se também a influência do coeficiente de troca de calor por convecção nos valores de condutividade térmica. Para tal, simulou-se no modelo matemático os casos de coeficientes de convecção iguais a 1, 2, 5, 10, 15 e 20W/m²K em amostra de vidro e poliestireno expandido de 10 e 20mm de espessura. A Figura 4.13 mostra os resultados obtidos na simulação.

Percebe-se que os erros aumentam a medida em que também se aumenta o coeficiente de troca de calor por convecção. Novamente os maiores erros ocorrem nas amostras de poliestireno expandido, podendo chegar a 17,0% no caso de amostra com espessura de 20mm e coeficiente de troca de calor por convecção igual a 20 W/m²K.

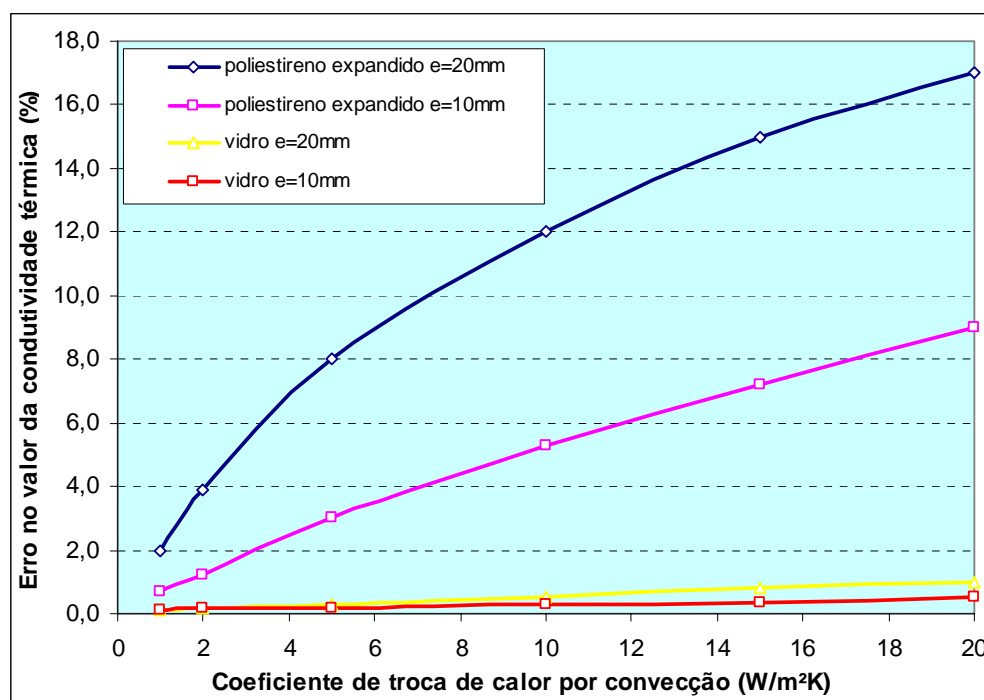


Figura 4. 13. Influência do coeficiente de troca de calor por convecção no valor da condutividade térmica.

4.4.5 Influência do material construtivo do fluxímetro no valor da condutividade térmica

Analizou-se também a influência do material construtivo do fluxímetro nos valores de condutividade térmica. Suspeitou-se de início que poderiam estar ocorrendo fugas pelo corpo do fluxímetro por este ser altamente condutor de calor. Desta forma, simulou-se no modelo matemático, várias condutividades térmicas equivalentes para o fluxímetro (valores de 0,10 até 150,00W/mK). Simularam-se somente amostras de 20mm de poliestireno expandido, para amostras de vidro, o erro no valor da condutividade térmica fica abaixo de 1,0%. A Figura 4.14 mostra a influência do material do fluxímetro (representado pela condutividade térmica equivalente) no valor da condutividade térmica da amostra.

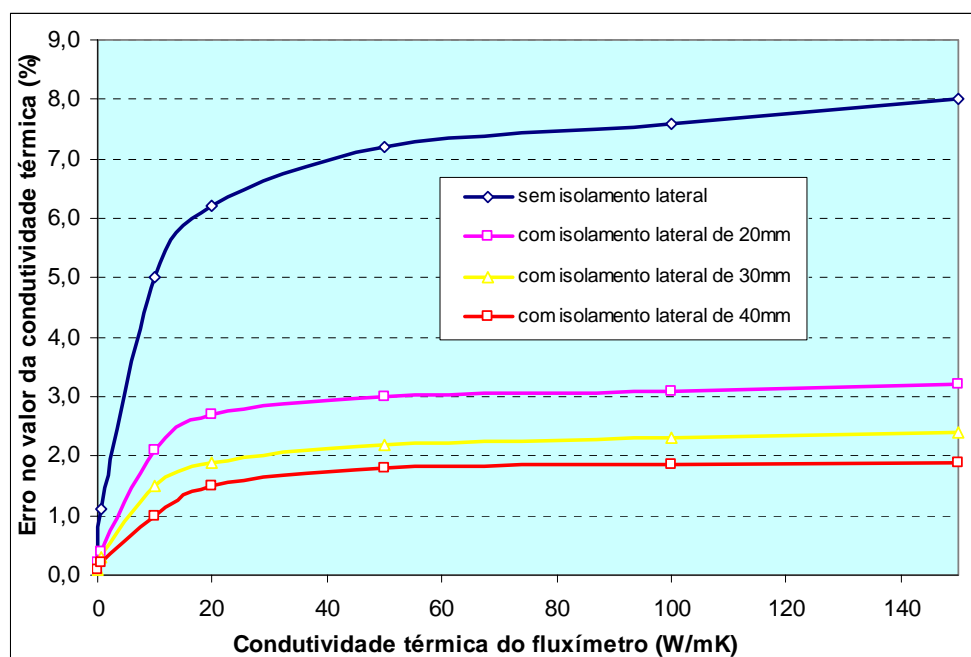


Figura 4. 14. Influência do material do fluxímetro no valor da condutividade térmica.

Percebe-se pela Figura 4.14 que existe influência do material do fluxímetro no valor da condutividade térmica, sendo que quanto maior for a condutividade térmica do fluxímetro, maiores serão os erros no valor da condutividade térmica. Nas amostras de poliestireno expandido o erro chega próximo a 8,0%, porém com um fluxímetro com condutividade térmica menor que 1,00W/mK, os erros podem ser reduzidos a valores abaixo de 1,2%. O isolamento lateral também se mostra eficiente na minimização dos erros, mesmo com um fluxímetro com alta condutividade térmica (150,00W/mK), utilizando-se um isolamento lateral de 40mm, os erros podem ser reduzidos a valores abaixo de 2,0%.

4.4.6 Influência da temperatura da placa fria no valor da condutividade térmica

Até o presente momento, no LMPT os ensaios com o método fluximétrico são realizados com uma placa fria que dissipa calor para o ar ambiente. Existe a possibilidade de se efetuar esta refrigeração através de uma placa refrigerada por água com temperatura controlada.

Para verificar a influência de se ter uma temperatura mais baixa que a do ambiente na placa fria, simulou-se no modelo matemático temperaturas na placa fria variando de 22,0 a 25,0°C. Simularam-se amostras de 10 e 20mm de poliestireno expandido e vidro sem isolamento lateral. A Figura 4.15 mostra a influência da temperatura da placa fria no valor da condutividade térmica medida.

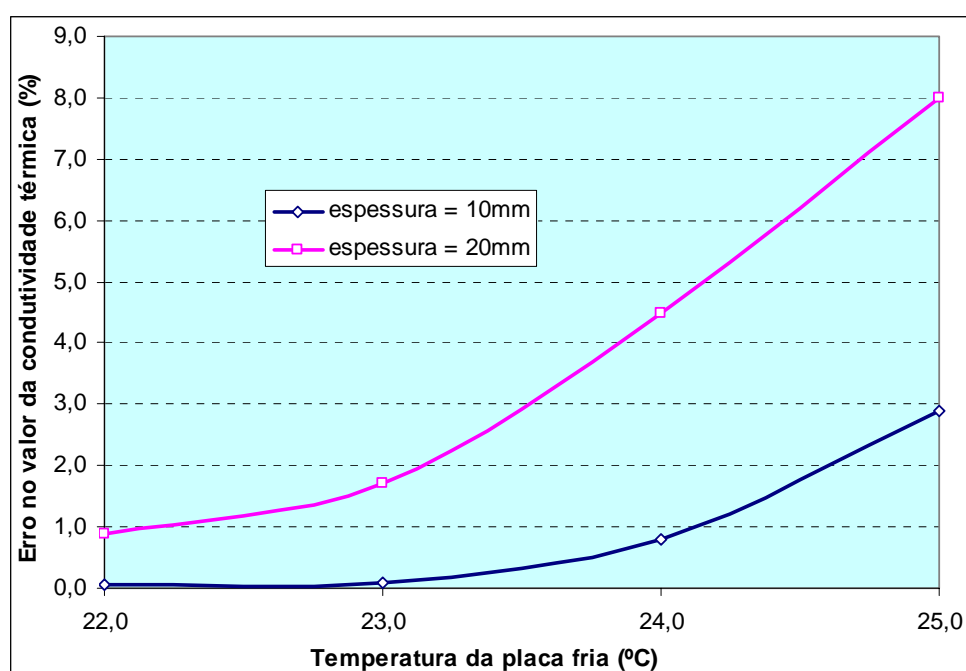


Figura 4. 15. Influência da temperatura da placa fria no valor da condutividade térmica.

Percebe-se pela Figura 4.15 que quanto menor a temperatura da placa fria, menor será o erro na medição da condutividade térmica. Isso se deve ao fato da temperatura média da amostra estar mais próxima da temperatura do ar, minimizando as fugas de calor laterais.

4.4.7 Influência da dimensão do anel de proteção lateral no valor da condutividade térmica

Para se verificar a influência do anel lateral no valor da condutividade térmica, simulou-se no modelo matemático amostras de poliestireno expandido e vidro, variando-se

a espessura da amostra e dimensão do anel de proteção lateral. A Figura 4.16 mostra os resultados obtidos em amostras de poliestireno expandido, enquanto que a Figura 4.17 mostra os resultados para amostras de vidro. Percebe-se que o erro no valor da condutividade térmica diminui à medida que se aumenta a dimensão do anel de proteção lateral. Os erros em uma amostra de poliestireno expandido de 20mm de espessura são da ordem de 3,0% quando se usa um anel de proteção com dimensão de 20mm. Para amostras de vidro os erros são menores que 3,0%.

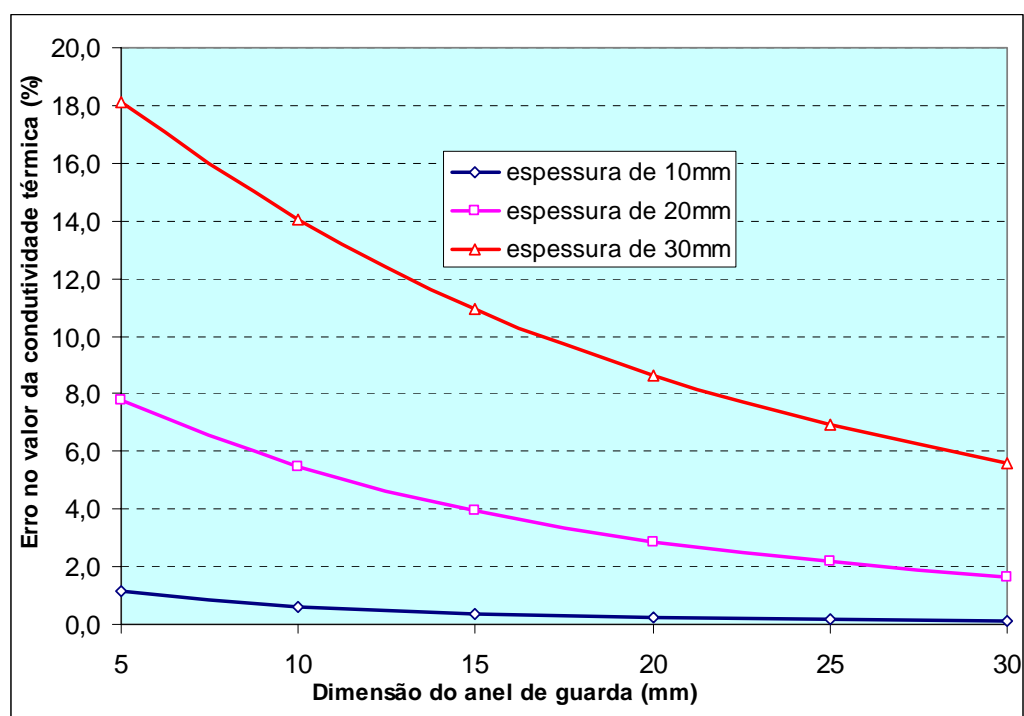


Figura 4. 16. Influência da dimensão do anel de proteção lateral no valor da condutividade térmica em amostras de poliestireno expandido.

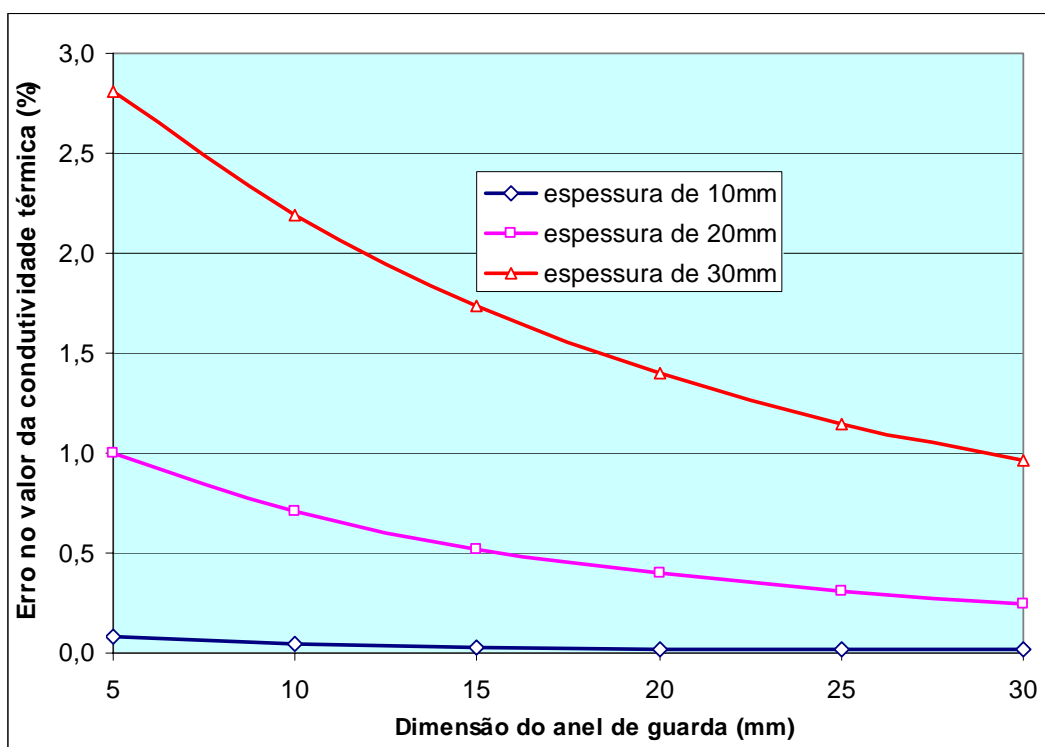


Figura 4. 17. Influência da dimensão do anel de proteção lateral no valor da condutividade térmica em amostras de vidro.

4.5 MEDIÇÕES PÓS-SIMULAÇÃO

Depois de realizadas a simulação, verificou-se que a condutividade térmica do fluxímetro apresentou-se como uma fonte de erro nas medições. Com objetivo de se verificar experimentalmente esta influência, efetuaram-se medições com os fluxímetros modificados. A principal diferença entre estes fluxímetros e os utilizados nas medições anteriores é o fato de estes novos fluxímetros possuírem um *gap* em sua estrutura. A função do *gap* é minimizar as perdas de calor pela estrutura do fluxímetro. Com a presença do *gap*, o fluxímetro apresentou uma condutividade térmica equivalente de 0,40W/mK.

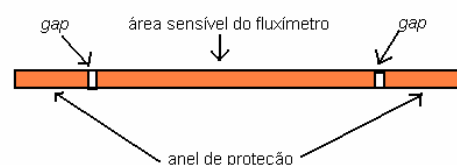
O *gap* representa uma descontinuidade na camada de cobre inferior do fluxímetro. A alta condutividade térmica do cobre é responsável por fugas de calor pelo próprio corpo do fluxímetro (conforme visto no item 4.4.5), e com esta descontinuidade, espera-se reduzir estas fugas de calor. Os fluxímetros com *gap* apresentaram uma resistência térmica de

0,002m²K/W. A Figura 4.18 (a) mostra um fluxímetro com *gap* utilizado nos ensaios e a Figura 4.16 (b) mostra um esquema representativo de um corte no fluxímetro com *gap*.

As medições foram feitas em amostras de poliestireno expandido, por estas apresentarem os maiores desvios na leitura dos fluxos de calor e conseqüentemente, maior erro na medição da condutividade térmica. Como se trata de uma primeira versão dos fluxímetros modificados, o *gap* apresenta imperfeições que, em amostras incompressíveis, formam espaços de ar que perturbam a medição. Por esta razão, as amostras de vidro não foram utilizadas.



(a)



(b)

Figura 4. 18 Fluxímetro com *gap*.

A Figura 4.19 mostra as densidades de fluxo de calor lidas pelos fluxímetros superior e inferior num ensaio de uma amostra de poliestireno expandido de 20mm de espessura. Percebe-se que o fluxímetro superior indica um fluxo maior que o inferior; a diferença entre os fluxos é de aproximadamente 5,0%. Convém ressaltar que as medições com os fluxímetros sem *gap* indicaram diferenças de até 20,0% para a mesma amostra.

Como complemento, a Figura 4.20 mostra as diferenças de fluxo de calor para amostras de poliestireno expandido de 10 e 20mm de espessura. Percebe-se que para amostras de 10mm a diferença é ligeiramente menor: em torno de 3,5%.

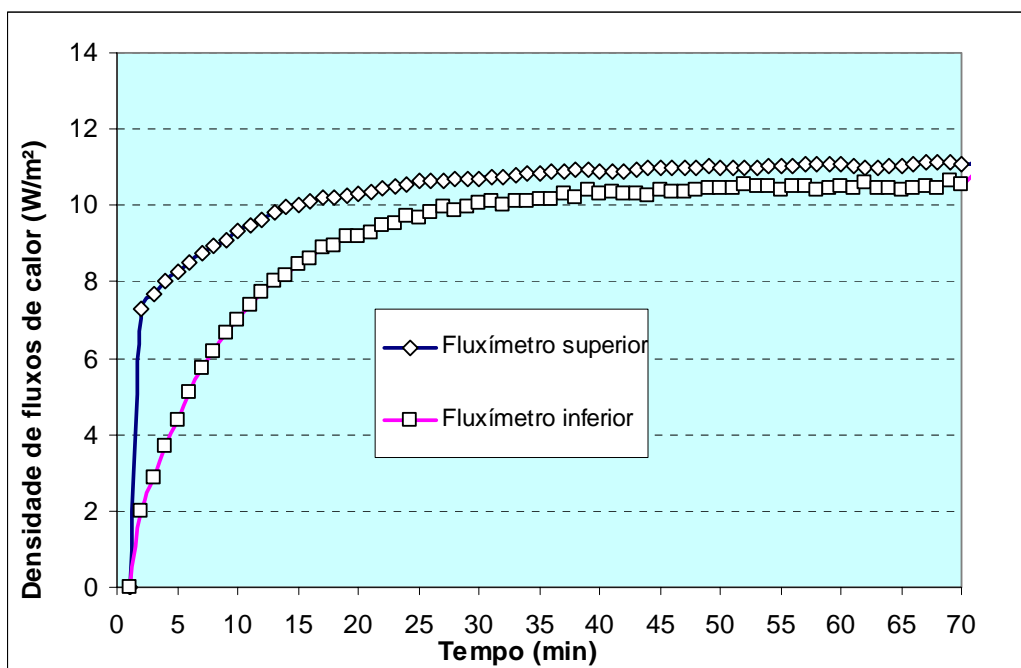


Figura 4. 19. Densidades de fluxo de calor medidas pelos fluxímetros modificados com *gap* no ensaio de uma amostra de poliestireno expandido de 20mm de espessura.

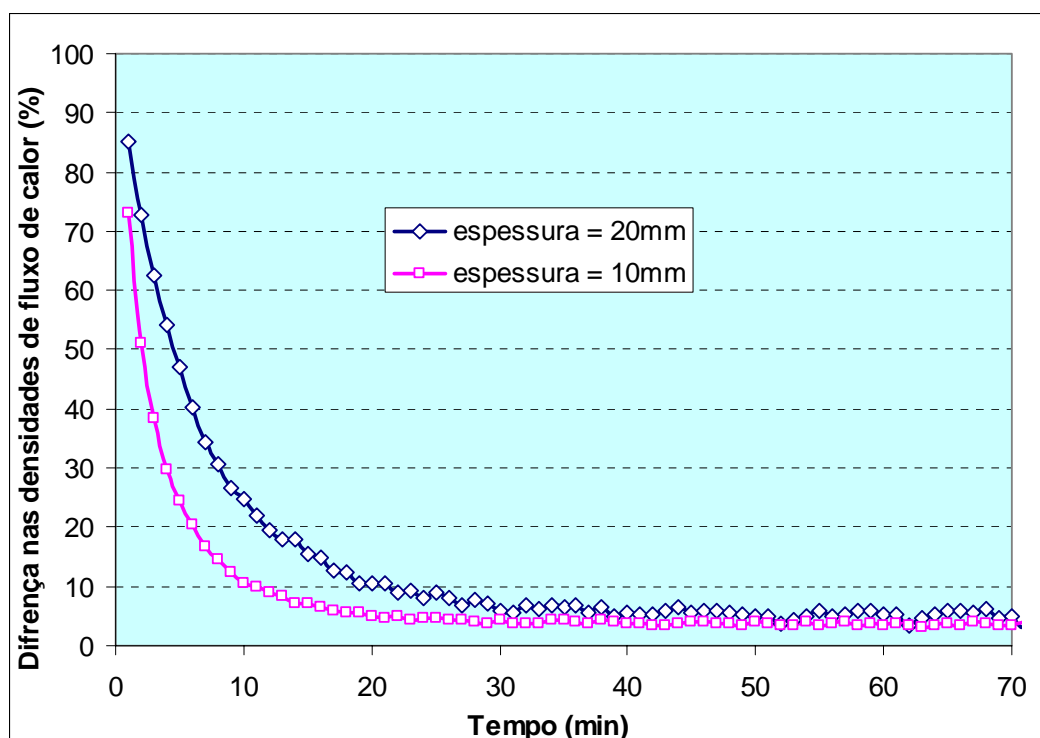


Figura 4.20. Diferenças nas densidades de fluxo de calor medidas pelos fluxímetros modificados com *gap* no ensaio de amostras de poliestireno expandido de 10 e 20mm de espessura.

Como forma de comparação, a Tabela 4.5 mostra os valores de densidade de fluxo de calor superior e inferior e de condutividade térmica em duas medições: uma realizada com fluxímetro sem *gap* e outra com fluxímetro com *gap* para ensaios em uma amostra de poliestireno expandido de 20mm de espessura. Percebe-se que, em média, os valores de condutividade térmica obtidos pela utilização do fluxímetro com *gap* são 19,1% menores que os valores obtidos com o fluxímetro original. Os desvios nas densidades de fluxo de calor também são menores, nos fluxímetros originais, a diferença chega a 20,4%, ao passo que para os fluxímetros com *gap* essa diferença se reduz a 4,2% em média.

Também como forma de comparação, a Tabela 4.6 mostra os valores de densidade de fluxo de calor superior e inferior e de condutividade térmica somente em ensaios utilizando fluxímetros com *gap*. Percebe-se que em média, os valores da condutividade térmica apresentam uma variação de 9,8%. Sendo que os valores maiores são obtidos em ensaios com amostra de 20mm de espessura. Convém lembrar que nas medições com

fluxímetros sem gap, esta diferença entre os valores de condutividade térmica era, em média, ordem de 18,2% (Tabela 4.3)

Tabela 4. 5 Comparação entre as densidades de fluxo de calor e condutividades térmicas medidas pelos fluxímetros com *gap* e original em amostras de poliestireno expandido com espessura 20mm.

Ensaio	Fluxímetro sem <i>gap</i>			Fluxímetro com <i>gap</i>			Diferença no valor de λ (%)
	q_{superior} (W/m ²)	q_{inferior} (W/m ²)	λ (W/mK)	q_{superior} (W/m ²)	q_{inferior} (W/m ²)	λ (W/mK)	
1	17,90	14,20	0,053	11,07	10,54	0,042	20,7
2	17,50	13,90	0,054	11,20	10,84	0,043	20,3
3	18,05	13,69	0,054	12,17	11,50	0,046	14,8
4	17,75	14,85	0,053	11,05	10,50	0,042	20,7
média	17,80	14,16	0,053	11,32	10,84	0,043	19,1

Tabela 4. 6. Comparação dos valores de condutividade térmica obtidos em amostras de 10 e 20mm com a utilização do fluxímetro com *gap*.

Ensaio	Amostra de espessura 10mm			Amostra de espessura 20mm			Diferença no valor de λ (%)
	q_{superior} (W/m ²)	q_{inferior} (W/m ²)	λ (W/mK)	q_{superior} (W/m ²)	q_{inferior} (W/m ²)	λ (W/mK)	
1	34,77	33,64	0,039	11,07	10,54	0,043	9,3
2	35,01	33,78	0,039	11,20	10,84	0,043	9,3
3	34,32	33,10	0,039	12,17	11,50	0,046	15,2
4	35,22	33,81	0,039	11,05	10,50	0,042	7,1
média	34,83	33,58	0,039	11,32	10,84	0,043	9,8

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

5.1 CONCLUSÕES REFERENTES AOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A caracterização das propriedades térmicas dos materiais de construção civil produzidos no Brasil mostra-se importante, uma vez que ainda não existe uma cultura investigativa destas propriedades e também são poucos os laboratórios que possuem equipamentos para estes ensaios. Este trabalho apresentou o método fluximétrico como uma alternativa para medição da condutividade térmica.

Os erros decorrentes da utilização do método fluximétrico em medições de condutividade térmica de materiais foram analisados tanto do ponto de vista teórico (simulações computacionais) quanto experimental (medições experimentais em laboratório).

Com a utilização de termografia, verificou-se a distribuição de temperaturas na resistência aquecedora do método fluximétrico. Numa área central da resistência aquecedora, pode-se admitir que a temperatura é homogênea, já nas laterais a distribuição não é uniforme. A não uniformidade da distribuição das temperaturas na região periférica da resistência aquecedora é explicada pelas perturbações decorrentes dos fenômenos de borda, onde uma maior quantidade de calor é perdida para o ar ambiente.

Nas medições de condutividade térmica nas amostras de vidro e poliestireno expandido, verificaram-se desvios significativos nas densidades de fluxo de calor superior e inferior principalmente nas amostras de poliestireno expandido. Os desvios nas densidades de fluxo de calor são da ordem de 20,0% para amostras de poliestireno expandido com 20mm de espessura. Nas amostras de vidro os desvios são menores, em torno de 7,5% para amostras de 20mm de espessura.

Para analisar o experimento real, desenvolveu-se um modelo matemático, cujas equações foram solucionadas pelo programa computacional EES (*Engineering Equation Solver*). O modelo foi considerado validado após apresentar desvios da ordem de 14% entre os valores calculados por este e os obtidos experimentalmente. Depois de validado o modelo matemático, procedeu-se as análises dos diferentes parâmetros intervenientes ao ensaio no valor da condutividade térmica.

Através das simulações computacionais verificou-se a influência dos diversos parâmetros intervenientes ao ensaio no valor da condutividade térmica medida (análise

paramétrica). A espessura da amostra tem impacto no valor da condutividade térmica, sendo que quanto maior, maior também será o erro na medição. Já a condutividade térmica da amostra gera maiores erros quanto menor for, ou seja, condutividades térmicas baixas geram erros grandes. Em amostras de poliestireno expandido com espessura de 20mm o erro é da ordem de 8,0% no valor da condutividade térmica medida.

Analizou-se também a influência do isolamento lateral e concluiu-se que quanto maior for o isolamento lateral, menor serão os erros na medição. Em amostras de poliestireno expandido, o erro que, sem isolamento é da ordem de 8,0%, pode ser reduzido a magnitudes inferiores a 1,5% quando um isolamento de 50mm de poliestireno expandido é utilizado.

O coeficiente de troca de calor por convecção também tem influência nos valores medidos, sendo que quanto maior for este parâmetro, maior será o erro na medição. Em amostras de poliestireno expandido com espessura de 20mm o erro pode chegar a 17,0%, quando este coeficiente tem valor de $20\text{W/m}^2\text{K}$.

Outra conclusão foi referente ao material do fluxímetro: quanto maior for a condutividade térmica deste, maiores serão os erros. O fluxímetro inicialmente utilizado possuía uma condutividade térmica equivalente de $150,00\text{ W/mK}$, o que gerava um erro da ordem de 8,0% no valor da condutividade térmica medida. Utilizando-se fluxímetros com condutividade térmica inferior a $1,00\text{W/mK}$, os erros podem ser reduzidos para valores abaixo de 1,0%.

A influência da temperatura da placa fria também foi estudada, sendo que quanto menor for a temperatura, menor será o erro na medição da condutividade térmica. Nos ensaios atuais com o método fluximétrico, utiliza-se temperatura da placa fria igual a do ar ambiente. Nestas condições os erros são da ordem de 8,0%, utilizando-se temperaturas mais baixas podem-se conseguir erros menores. Utilizando-se uma temperatura de placa fria igual a 22°C , o erro na medição da condutividade térmica não ultrapassa 1,0%.

O anel de proteção lateral apresenta influência os erros na medição da condutividade térmica. Em amostras de poliestireno expandido, os erros podem chegar a 18,0% em amostras de 0,03m de espessura utilizando um anel de 0,005m. Em amostras de vidro os erros são menores, em torno de 3,0%.

Depois de efetuadas as análises pelo modelo matemático, realizaram-se medições utilizando-se fluxímetros com uma nova proposta construtiva. Os fluxímetros apresentam uma descontinuidade na camada inferior de cobre, o que diminui a sua condutividade térmica, e conseqüentemente as fugas de calor pela própria estrutura do dispositivo. Os ensaios experimentais comprovam os resultados obtidos com o modelo matemático, o desvio nas densidades de fluxo de calor que, com os fluxímetros originais eram de 20,4%, se reduziram a desvios da ordem de 4,2%.

Como conclusão geral pode-se dizer que nestes ensaios, deve-se maximizar a espessura do isolamento lateral e a dimensão do anel de proteção e minimizar a espessura da amostra, a condutividade térmica do fluxímetro, o coeficiente de convecção e a temperatura da placa fria.

5.2 RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A presente pesquisa pode ser complementada com mais algumas análises e ensaios que, neste trabalho, não foram realizados por alguns motivos. Estes complementos podem auxiliar o entendimento dos fenômenos que ocorrem durante os ensaios do gênero. Dentre estes complementos destacam-se alguns a seguir:

- Medições de condutividade térmica em amostras com condutividades até 2,00W/mK, como por exemplo amostras de concreto e argamassa.
- A realização de medições com diferentes temperaturas de placa fria, fazendo-se o uso de um banho termostatzado, utilizando água como fluido refrigerante. Desta forma a influência da temperatura da placa fria nos valores da condutividade térmica pode ser avaliada experimentalmente.
- Medições com a utilização de um isolamento lateral eficiente para comprovar os resultados obtidos com o modelo computacional.
- Simulação computacional do experimento fluximétrico em um programa de CFD (*Computational Fluid Dynamics*), como o CFX[®].

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. **NBR 12820: Concreto endurecido – determinação da condutividade térmica.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 1993.

ABNT. **Projeto de Norma 02:135. 07-002: Desempenho Térmico de Edificações: Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, do atraso térmico e do fator de calor solar de elementos e componentes de edificações.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT. **Projeto de Norma 02:135. 07-004: Desempenho Térmico de Edificações: Parte 4: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT. **Projeto de Norma 02:135. 07-005: Desempenho Térmico de Edificações: Parte 5: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo método fluximétrico.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2003.

ANFOR. **NF X 10-021: Détermination de la conductivité thermique – méthode de la plaque chaude gardée avec échantillons symétriques.** 1973.

ANFOR. **NF X 10-025: Détermination de la résistance thermique et de la conductivité thermique em regime stationnaire – méthode fluxométrique.** 1991.

ASTM. **C177: Standard test method for steady-state thermal transmission properties by means of the guarded hot plate.** Americana Society of testing Materials, Philadelphia. 1985.

ASTM. **C518: Standard Test Method for steady-state Heat Flux measurements and thermal transmission properties by means the heat flow meter apparatus.** American Society of Testing Materials, Philadelphia, 1985.

ASTM. **E691: Standard Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method.** American Society of Testing Materials, Philadelphia, 1999.

BSI: **BS874: British Standard Methods for determining thermal insulating properties with definitions of thermal insulating terms.** Brussels. 1986.

DE PONTE, F.; DI FILIPPO, P. Design criteria for guarded hot plate apparatus. **Heat transmission measurements in thermal insulations, ASTM STP 544**, p. 97-117, 1974.

DIN: **DIN 52612: Determination of thermal conductivity by means of guarded hot plate apparatus: conversion of the measured values for building application.** 1984

EQUIPE FURNAS. **Concreto: ensaios e propriedades.** PINI, São Paulo, 1997.

GELLER, H. S. **O uso eficiente da eletricidade:** uma estratégia de desenvolvimento para o Brasil. Rio de Janeiro: INEE – Instituto Nacional de Eficiência Energética, 1992.

GÜTHS, S. **Um método transiente para determinação de propriedades térmicas.** Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC. Florianópolis. 1990.

GÜTHS, S.; NICOLAU, V.P. **Instrumentação em ciências térmicas.** Apostila EMC-UFSC, Florianópolis, 1998.

HEALY, W.M. **Using finite element analysis to design a new guarded hot plate apparatus for measuring the thermal conductivity of insulating materials.** National Institute of Standards and Technologies – NIST, 2001.

INCROPERA, F.; De WITT, D.P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. LTC. Rio de Janeiro, 1998.

ISO: **ISO 8301: Thermal insulation – Determination of steady-state thermal resistance and related properties – Heat flow meter apparatus**. International Organization of Standardization. Geneva. 1991.

ISO: **ISO 8302: Thermal insulation – Determination of steady-state thermal resistance and related properties – Guarded hot plate apparatus**. International Organization of Standardization. Geneva. 1991.

LAM, J.C.; HUI, S.C.M.; CHAN, A.L.S. Regression analysis of high-rise fully air-conditioned office buildings. **Energy and Buildings**, v.26, p. 189-197, 1997.

LAURENTI, L.; MARCOTULIO, F.; DE MONTE, F. Determination of the thermal resistance of walls through a dynamic analysis of in-situ data. **International Journal of Thermal Sciences**, v.43. p.297-306, 2004.

LISKER, L.S.; SOLOVYEV, S.V.; AXCELL, B.P.; VARLOW, B.R.; DONNELLY, K. A transient technique for measuring the thermal conductivity of non-metals. **Experimental Thermal and Fluid Science**. v. 25, p.377-382, 2001.

MME. Ministério das Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional**. Ministério das Minas e Energia. Brasília, DF, 2000.

MOURA, L. M. **Desenvolvimento de um protótipo de placa quente protegida**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC. Florianópolis. 1993

PHILIPPI, P. C.; NICOLAU, V. P.; CUNHA NETO, J. A. B.; PERIN, M. G.; GÜTHS, S.; FERNANDES, C. P. **Procedimentos para a determinação das propriedades térmicas de materiais e elementos de edificações**. Relatório do SITERPA, UFSC. Florianópolis. 1988.

SALMON, D.; TYE, R. **An inter-comparison of guarded hot plate and heat flow meter apparatus within the united Kingdom and Ireland**. NPL Report, Middlesex, 2001.

TROUSSART, L. R. **Analysis of errors in guarded hot plate measurements as compiled by the finite element method**. Guarded hot plate and heat flow meter methodology, ASTM STP 879, American Society of Testing Materials. Philadelphia, 1985.

TYE, R.P.; SPINNEY, S.C. Measurement of the specific heat of buildings materials. **ASHRAE Transactions**, v.84, part 1, p. 675-687, 1978.

ZARR, R.R. **A history of testing heat insulators at the National Institute of Standards and Technology**. National Institute of Standard and Technologies – NIST, 2001.

ZARR, R.R.; FILLIBEN, J. J. **An international study of guarded hot plate laboratories using fibrous glass and expanded polystyrene reference materials**. International standards, Insulation materials, Testing and application, ASTM STP 1426, American Society of Testing Materials. Philadelphia, 2002.

ZARR, R.R.; LAGERGREN, E.S. Interlaboratory “pilot run” study of small heat-flow-meter apparatus for ASTM C 518. **Journal of Testing and Evaluation, JTEVA**, v. 27, p.357-367, 1999.

ZENG, J.S.Q.; STEVENS, P.C.; HUNT, A.J.; GRIEF, R.; LEE, D. Thin-film-heater thermal conductivity apparatus and measurements of thermal conductivity of silica aerogel. **Journal of Heat and Mass Transfer**. v.39, p.2311-2317, 1996.

WAKILI, K.G.; BINDER, B.; VONBANK, R. A simple method to determine the specific heat capacity of thermal insulations used in building construction. **Energy and Buildings**. v.35, p. 413-415. 2003.

APÊNDICES

APÊNDICE A. CALIBRAÇÃO DE TERMOPAR.

O termopar utilizado na leitura da temperatura diferencial entre as faces da amostra no método fluximétrico foi calibrado segundo uma junta de referência com temperatura próxima a zero e outro banho com temperatura variável de 25 a 80°C. Os banhos foram construídos com duas garrafas térmicas, uma contendo gelo fundente (junta de referência) e outra com água e uma resistência elétrica.

Efetuar-se medições nas temperaturas do banho quente variando de 28,4 a 49,8°C. As temperaturas foram medidas por termômetros de vidro marca Incoterm e Omega, com precisão de 0,1°C. Para cada temperatura do banho quente, os sinais provenientes do termopar eram lidos através de um multímetro marca HP 34401A. A Tabela I mostra os valores obtidos no ensaio. Com este conjunto de valores, ajustou-se uma curva de temperatura lida em função da tensão proveniente dos fluxímetros (Eq. I). Observou-se um erro máximo entre as temperaturas medidas no experimento e as ajustadas pela curva de 0,12°C.

Tabela I .Valores obtidos na calibração do termopar.

Banho frio (°C)	Banho quente (°C)	ΔT (°C)	Tensão (mV)
0,0	27,2	27,2	1058
0,0	34,4	34,4	1367
0,0	46,7	46,7	1870
0,0	52,7	52,7	2122
0,0	70,2	70,2	2887
0,0	79,3	79,3	3289

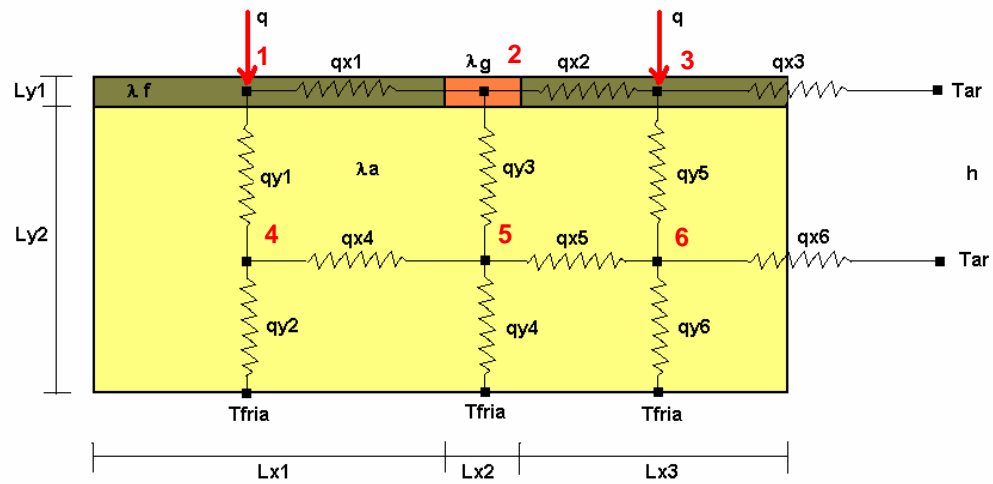
$$T = -0,00843 + 0,0259.v - 7,11663.10^{-7}.v^2 + 2,85872.10^{-11}.v^3 \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde: - T é a temperatura, em °C;

- v é a tensão fornecida pelo termopar, em mV.

APÊNDICE B. EQUAÇÕES UTILIZADAS NO MODELO MATEMÁTICO

Aqui são apresentados os nós considerados no modelo matemático, bem como as equações para cada nó.



Nó 1:

$$q.Lx1 = \lambda a.Lx1 \cdot \left(\frac{Tf1 - Ta1}{\frac{Ly2}{2}} \right) + \left(\frac{1}{\frac{Lx1}{2\lambda f} + \frac{Lx2}{2\lambda g}} \right) Ly1.(Tf1 - Tg)$$

Nó 2:

$$\left(\frac{1}{\frac{Lx1}{2\lambda f} + \frac{Lx2}{2\lambda g}} \right) Ly1.(Tf1 - Tg) = \lambda a.Lx2 \cdot \left(\frac{Tg - Ta2}{\frac{Ly2}{2}} \right) + \left(\frac{1}{\frac{Lx2}{2\lambda g} + \frac{Lx3}{2\lambda f}} \right) Ly1.(Tg - Tf2)$$

Nó 3:

$$q.Lx3 + \left(\frac{1}{\frac{Lx2}{2.\lambda g} + \frac{Lx3}{2.\lambda f}} \right) .Ly1.(Tg - Tf2) = \left(\frac{1}{\frac{Lx3}{2.\lambda f}} + \frac{1}{h} \right) .Ly1.(Tf2 - Tar) + \lambda a.Lx3. \left(\frac{Tf2 - Ta3}{\frac{Ly2}{2}} \right)$$

Nó 4:

$$\lambda a.Lx1. \left(\frac{Tf1 - Ta1}{\frac{Ly2}{2}} \right) = \lambda a.Lx1. \left(\frac{Ta1 - Tfria}{\frac{Ly2}{2}} \right) + \lambda a.Ly2. \left(\frac{Ta1 - Ta2}{\frac{Lx1 + Lx2}{2}} \right)$$

Nó 5:

$$\lambda a.Lx2. \left(\frac{Tg - Ta2}{\frac{Ly2}{2}} \right) + \lambda a.Ly2. \left(\frac{Ta1 - Ta2}{\frac{Lx1 + Lx2}{2}} \right) + \lambda a.Ly2. \left(\frac{Ta2 - Ta3}{\frac{Lx2 + Lx3}{2}} \right) + \lambda a.Lx2. \left(\frac{Ta2 - Tfria}{\frac{Ly2}{2}} \right)$$

Nó 6:

$$\lambda a.Ly2. \left(\frac{Ta2 - Ta3}{\frac{Lx2 + Lx3}{2}} \right) + \lambda a.Lx3. \left(\frac{Tf2 - Ta3}{\frac{Ly2}{2}} \right) = \left[\left(\frac{1}{\frac{Lx3}{2.\lambda a} + \frac{1}{h}} \right) .(Ta3 - Tar) \right] Ly2 +$$

$$+ \lambda a.Lx3 \left(\frac{Ta3 - Tfria}{\frac{Ly2}{2}} \right).$$

Fluxos de calor nas resistências térmicas verticais (y):

$$qy1 = \lambda a. \left(\frac{Tf1 - Ta1}{\frac{Ly2}{2}} \right)$$

$$qy2 = \lambda a. \left(\frac{Ta1 - Tfria}{\frac{Ly2}{2}} \right)$$

$$qy3 = \lambda a. \left(\frac{Tg - Ta2}{\frac{Ly2}{2}} \right)$$

$$qy4 = \lambda a. \left(\frac{Ta2 - Tfria}{\frac{Ly2}{2}} \right)$$

$$q_{y5} = \lambda a. \left(\frac{T_{f2} - T_{a3}}{\frac{L_{y2}}{2}} \right)$$

$$q_{y6} = \lambda a. \left(\frac{T_{a3} - T_{fria}}{\frac{L_{y2}}{2}} \right)$$

Fluxos de calor nas resistências térmicas horizontais (x):

$$q_{x1} = \left(\frac{1}{\frac{L_{x1}}{2.\lambda_f} + \frac{L_{x2}}{2.\lambda_g}} \right) . (T_{f1} - T_g)$$

$$q_{x2} = \left(\frac{1}{\frac{L_{x3}}{2.\lambda_f} + \frac{L_{x2}}{2.\lambda_g}} \right) . (T_g - T_{f2})$$

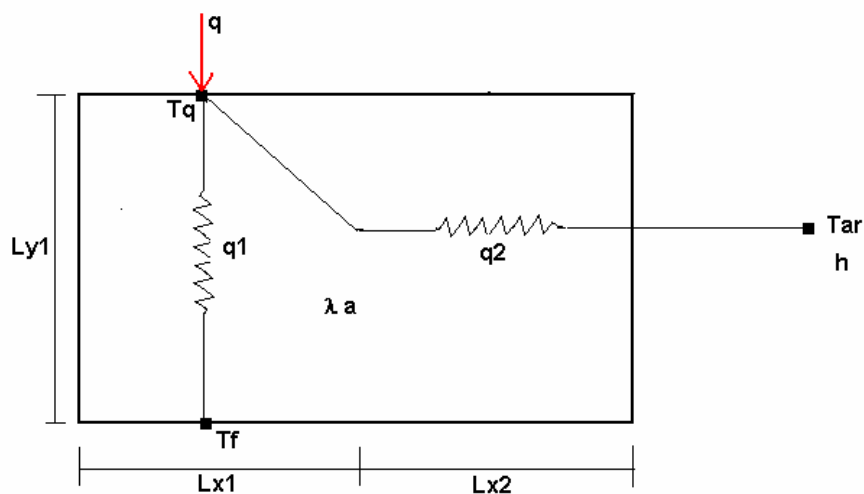
$$q_{x3} = \left(\frac{1}{\frac{L_{x3}}{2.\lambda_f} + \frac{1}{h}} \right) . (T_{f2} - T_{ar})$$

$$qx4 = \lambda a. \left(\frac{\frac{Ta1 - Ta2}{Lx1 + Lx2}}{2} \right)$$

$$qx5 = \left(\frac{\frac{Ta2 - Ta3}{Lx2 + Lx3}}{2} \right) . \lambda a$$

$$qx6 = \left(\frac{\frac{1}{\frac{Lx3}{2.\lambda a} + \frac{1}{h}}}{2} \right) . (Ta3 - Tar)$$

APÊNDICE C. DEDUÇÃO DA EQUAÇÃO PARA AVALIAR O ERRO PERCENTUAL NAS MEDIÇÕES DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA.



$$E(\%) = \left\{ \frac{\lambda a - \left[\frac{\left(\frac{\lambda a \cdot Lx1 \cdot \Delta T}{Ly1} + q \cdot Lx1 \right)}{2} \cdot Ly1 \right]}{\Delta T \cdot Lx1}}{\lambda a} \right\} \cdot 100$$

$$\Delta T = (Tq - Tf)$$

$$Tq = \frac{q.Lx1 + \lambda a.Lx1 \frac{Tf}{Ly2} + \frac{Tar}{\left(\frac{Lx2}{\lambda a.Ly1} + \frac{1}{h.Ly2} \right)}}{\frac{\lambda a.Lx1}{Ly1} + \frac{1}{\left(\frac{Lx2}{\lambda a.Ly1} + \frac{1}{h.Ly1} \right)}}$$

Assumindo: Tf = Tar;

$$E(\%) = 50 \frac{Ly1^2}{Lx1(Lx2 + \frac{\lambda a}{h})}$$